

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Немање Чукарића, мастер инж. ел. и рач.

Одлуком број 5030/09-3 од 14.1.2015. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Немање Чукарића под насловом

**“Моделовање електронских и шупљинских стања у полупроводничким наноструктурама помоћу вишезонске  $k\cdot p$  теорије”**

**[“Modelling the electron and hole states in semiconductor nanostructures by the multiband  $k\cdot p$  theory”]**

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

Немања Чукарић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету школске 2009/2010. године (децембар 2009.). Кандидат је тему под насловом “*Моделовање електронских и шупљинских стања у полупроводничким наноструктурама помоћу вишезонске  $k\cdot p$  теорије*” (“*Modelling the electron and hole states in semiconductor nanostructures by the multiband  $k\cdot p$  theory*”) пријавио Комисији за студије III степена Електротехничког факултета 26.9.2013. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на седници одржаној 8.10.2013. године, одлуком бр. 5030/09-1, именовало 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 и др Дејан Гвоздић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду. Извештај Комисије је усвојен на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 5.11.2013. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације 18.11.2013. године (Одлука бр. 61206-5514/2-13).

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 је на седници одржаној 23.12.2014. године, одлуком бр. 5003/09-3 од 14.1.2015., именовало Комисију за преглед и оцену 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 Гвоздић, 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 фотонице 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 изради заједничког доктората заведен на Електротехничком факултету 21.6.2014. под бројем 1299.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Немања Чукарић, мастер инж. ел. и рач., рођен је 17.08.1985. године у Приштини. На Електротехнички факултет у Београду, Одсек физичка електроника, уписао се 2004. године, а дипломирао јула 2008. године на Смеру за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику са просечном оценом 9,78. Октобра 2008. године уписао је мастер студије на Модулу за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику Електротехничког факултета и исте завршио са највишом оценом (10) у јуну 2009. године, када је одбранио мастер рад под називом „Вишезонски модели ефективних маса аксијално симетричних наноструктура у магнетском пољу“. У периоду од септембра до новембра 2008. године спровео је истраживање из области моделовања квантних жица на Универзитету у Антверпену. За остварени успех током основних студија 2008. године награђен је наградом за најбољег студента Одсека за физичку електронику.

Од децембра 2009. године студент је докторских студија на Модулу за наноелектронику и фотонику Електротехничког факултета. Положио је све испите на докторским студијама са оценом 10. Израда докторске тезе је спроведена у оквиру споразума о заједничком докторату, потписаног између Универзитета у Београду, Универзитета у Антверпену и Електротехничког факултета. Током докторских студија више пута је боравио у Групи за теорију кондензоване материје, Департмана за физику, Универзитета у Антверпену.

Немања Чукарић је запослен на Електротехничком факултету од 2009. године. У звање сарадника у настави за ужу научну област Физичка електроника изабран је марта 2009. године, а у звање асистента изабран је априла 2010. Учествоје у извођењу рачунских и лабораторијских вежбања из предмета: Физика 1, Лабораторијске вежбе из физике 1, Квантна механика, Наноелектронске направе, Микроелектромеханички системи, Квантна информатика, Наномагнетизам и наноспинтроника, Елементи нанооптике и нанофотонице и Моделовање микроелектронских направа.

Немања Чукарић учествује на пројекту „Оптоелектронски нанодимензиони системи – пут ка примени“ (ИИИ 45003) Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Аутор је или коаутор 9 радова објављених у међународним часописима са СЦИ листе (4 рада су у ужој области дисертације), 1 рада публикованог у домаћем часопису, 1 рада презентованог на међународној конференцији и 5 радова публикованих у зборницима домаћих конференција (2 рада су у ужој области дисертације).

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на енглеском језику. Обим дисертације је 170 страна куцаног текста и садржи 59 слика и 3 табеле. Дисертација садржи насловне стране на енглеском и српском језику, страну са информацијама о менторима и члановима Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације, изјаве захвалности, резиме рада (на енглеском и српском) и садржај. Текст дисертације подељен је у 8 поглавља: 1. Introduction, 2. The multiband  $k\cdot p$  theory, 3. The electronic structure of silicon quantum wells, 4. Interband optical transitions in silicon quantum wells, 5. The 30-band model of the GaAs/(Al,Ga)As quantum wells, 6. Electron and hole states in ringlike quantum dots grown by droplet epitaxy, 7. Ringlike quantum dots in a magnetic field, and 8. Conclusion. Дисертација садржи и списак коришћене литературе, који обухвата 220 библиографских референци, додаток, биографију и листу публикација кандидата. Уз дисертацију су приложене Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље садржи кратак преглед техника производње Si/SiO<sub>2</sub> квантних јама, GaAs/(Al,Ga)As квантних јама и прстеноликих квантних тачака на бази GaAs/(Al,Ga)As и (In,Ga)As/GaAs хетероспојева. Описане су и упоређене следеће технике: спатеровање, хемијска депозиција из парне фазе, епитаксија молекуларним снопом и комбиновано термално и хемијско процесирање силицијума на изолатору. Објашњени су основни принципи производње прстеноликих квантних тачака помоћу технике капљичне епитаксије и раста у Странски-Крастанов моду. Зонска структура силицијума, GaAs, AlAs и InAs је такође укратко описана у овом поглављу.

У другом поглављу дати су принципи  $k\cdot p$  теорије. Разматрани су пертурбативни модели који описују електронску структуру у околини  $\Gamma$  тачке у првој Брилуеновој зони, као што су једнозонски модел ефективних маса за проводну зону и Латинџер-Конов модел за валентну зону. Затим је приказан поступак извођења 4-зонског и 6-зонског Латинџер-Конов модела. Укратко је описан и 30-зонски  $k\cdot p$  модел, који се користи за опис електронске структуре у целој првој Брилуеновој зони. Затим је приказана апроксимација анвелопних функција, која представља теоријски оквир за примену  $k\cdot p$  теорије на наноструктуре. Напошетку је у другом поглављу изложено неколико начина за контролу лажних решења која се могу јавити у прорачуну електронске структуре наноструктура помоћу  $k\cdot p$  теорије.

У трећем поглављу приказан је 30-зонски  $k\cdot p$  модел електронских и шупљинских стања у Si/SiO<sub>2</sub> квантним јамама, за које је претпостављено да су бесконачно дубоке. Својствени проблем решен је нумерички коришћењем развоја у базис формиран од стојећих таласа. У спектру се појављују два типа лажних решења и предложен је алгоритам за њихово уклањање. Утврђено је да је појава лажних решења у енергетском спектру анализираних квантних јама последица неадекватног описа електронске структуре масивног материјала ван прве Брилуенове зоне. Поред тога, разматрана је стабилност регуларних решења са променом величине базиса и показано је да су својствене енергије електрона стабилне, док својствене енергије шупљина показују осцилаторно понашање. Напошетку је показано да се ова нестабилност прорачуна шупљинских стања не појављује код структура са баријерама коначне висине.

У четвртном поглављу приказан је модел директних међузонских оптичких прелаза у Si/SiO<sub>2</sub> квантним јамама базиран на 30-зонском  $k\cdot p$  моделу стања у проводној зони и 6-зонском  $k\cdot p$  моделу стања у валентној зони. Анализирани су утицај ширине јаме на спектар међузонске апсорпције, при чему је ширина варирана у опсегу од 2 nm до 5 nm. Одређене су вредности енергетског процела, матричних елемената прелаза и коефицијента апсорпције.

Функција пропорционална степену ширине јаме коришћена је за фитовање нумерички одређене зависности најниже енергије прелаза (енергетског процепа) од ширине јаме. За међузонске матричне елементе оптичких прелаза показано је добро слагање резултата добијених помоћу  $k \cdot p$  теорије са резултатима једнозонског апроксимативног прорачуна. Због индиректног процепа силицијума, матрични елементи међузонских прелаза осцилују у функцији ширине јаме. Формиран је једноставан аналитички модел матричних елемената прелаза који се добро поклапа са резултатима 30-зонског модела. Нађено је да коефицијент међузонске апсорпције опада са повећањем ширине јаме.

У петом поглављу представљен је прорачун електронске структуре  $GaAs/(Al,Ga)As$  квантних јама. Као у четвртном поглављу, електронска стања су израчуната помоћу 30-зонског модела, док је 6-зонски Латинџер-Конов модел употребљен за рачунање шупљинских стања. Резултати 30-зонског модела су упоређени са резултатима једнозонског модела и показано је да је разлика између њих већа уколико је ширина јаме мања и равански таласни вектор већи. Такође је показано да су дисперзионе релације електронских стања у проводној зони добијене помоћу 30-зонског модела благо анизотропне, што је последица мешања између зоне  $s$  симетрије (која даје доминантан допринос стањима у проводној зони масивног материјала) и зона  $p$  и  $d$  симетрије. Помоћу 30-зонског модела израчунато је цепање нивоа у проводној зони услед Дрезелхаусове спин-орбитне интеракције и добијене вредности су упоређене са апроксимативним 2-зонским моделом. Показано је добро квалитативно слагање резултата добијених применом наведених модела, али је нађено да 2-зонски модел даје превелико Дрезелхаусово цепање стања. Такође, 6-зонски модел шупљинских стања је упоређен са 30-зонским моделом и показано је боље поклапање у случају ширих јама. На основу приказане анализе закључује се да је адекватан модел електронских и шупљинских стања у  $GaAs/(Al,Ga)As$  квантним јамама 14-зонски  $k \cdot p$  модел, који укључује највишу валентну зону  $p$  симетрије, најнижу проводну зону  $s$  симетрије и вишу проводну зону  $p$  симетрије.

У шестом поглављу анализирани су прстенолике  $GaAs/(Al,Ga)As$  квантне тачке које се производе капљичном епитаксијом. За прорачун електронских стања у проводној зони коришћен је једнозонски модел ефективних маса, док су шупљинска стања одређена помоћу 4-зонског Латинџер-Коновог модела. Предложен је упрошћени геометријски модел експериментално реализованих структура састављен од прстена и диска унутар отвора прстена. Посматран је утицај геометрије на електронску структуру тако што су вариране следеће димензије: 1) ширина прстена, 2) полупречник диска и 3) висина диска. Показано је да су у прстеноликој квантној тачки, чије су димензије типичне за структуре произведене техником капљичне епитаксије, електрон и шупљина доминантно лоцирани у прстену, чак и за висину диска која је 90 % висине прстена. Закључено је да се тополошки ефекти, као што је Ахаронов-Бомов ефекат, могу јавити и у прстеновима који нису потпуно отворени.

У седмом поглављу разматран је утицај магнетског поља на електронску структуру напрегнутих  $(In,Ga)As/GaAs$  прстеноликих тачака које се производе епитаксијалним растом у Странски-Крастанов моду. Ради разматрања утицаја механичког напрезања у анализу су укључене и ненапрегнуте  $GaAs/(Al,Ga)As$  квантне тачке. Усвојен је исти геометријски модел и коришћени су исти модели стања у проводној и валентној зони квантне тачке као у 6. поглављу. Детаљно је анализиран утицај геометрије, механичког напрезања и мешања зона на Ахаронов-Бомове осцилације електронских и шупљинских стања. Показано је да механичко напрезање доводи до доминантне локализације тешких шупљина унутар диска, па Ахаронов-Бомове осцилације енергетских нивоа у валентној зони напрегнуте структуре ишчезавају за мању дебљину диска него у валентној зони ненапрегнуте структуре. Такође је показано да независно од напрезања осцилације нестају за мању дебљину диска у валентној него у проводној зони. Објашњено је да је ово последица мешања зона лаких и тешких шупљина. За напрегнуте прстенолике квантне тачке показано је да је магнетизација осетљива на промене висине диска. Размотрен је и случај реалистичније геометрије од комбинације диск-прстен и показано је да квалитативних разлика у осцилацијама енергетских нивоа у

функцији магнетског поља нема, што је објашњено чињеницом да је Ахаронов-Бомов ефекат тополошки ефекат.

У осмом поглављу дат је закључак и сумирани су најбитнији резултати дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација припада модерним дисциплинама наноелектронике и фотоники и бави се електронским и оптичким особинама наноструктура. Тема дисертације су силицијумске квантне јаме, GaAs/(Al,Ga)As квантне јаме, GaAs/(Al,Ga)As квантне тачке и (In,Ga)As/GaAs квантне тачке.

Наноструктуре на бази силицијума, као најчешће коришћеног материјала у полупроводничкој индустрији, привлаче пажњу истраживача већ неколико деценија. Смањивање димензија условљено Муровим законом је довело до реализације компоненти чије су димензије неколико нанометара. Такве компоненте су базиране на наноструктурама, чије се коришћење у електроници базира на квантним ефектима. Ове структуре су сачињене од различитих материјала и имају различите особине од масивних узорака материјала од којих се производе. Бројне примене ових структура у електроници и фотоници су предложене и реализоване. На пример, транзистор на бази силицијумске наножице експериментално је реализован 2010. године. Иако масивни силицијум има индиректни енергетски процеп, силицијумске наноструктуре услед конфинирања могу имати директни процеп. Стога је на бази силицијумских наноструктура могуће формирати фотодетекторе, ласере и соларне ћелије високе ефикасности. Тако је ласер на бази силицијумске квантне јаме експериментално реализован 2009. године. Перспективна примена силицијумских наноструктура је за реализацију соларних ћелија треће генерације, за које се очекује да се може остварити ефикасност конверзије изнад Шокли-Кајзерове границе. Предности силицијумских наноструктура у односу на наноструктуре на бази III-V једињења су једноставнија фабрикација и лакша интеграција са осталим компонентама на полупроводничком чипу.

Примена силицијумских наноструктура за израду соларних ћелија и ласера зависи од постојања директног енергетског процепа. У дисертацији је наведени проблем разматран на примеру Si/SiO<sub>2</sub> квантних јама коришћењем 30-зонског  $k\cdot p$  модела. Показано је да вредност матричног елемента оптичких прелаза зависи од ширине квантне јаме. Вредности матричних елемената опадају са ширином јаме, али не монотонно, већ осцилаторно, што је детаљно анализирано. Изведени су апроксимативни аналитички изрази за вредности енергетског процепа и матричних елемената међузонских прелаза у функцији ширине јаме. Детаљно теоријски је истражена електронска структура Si/SiO<sub>2</sub> квантних јама помоћу 30-зонског  $k\cdot p$  модела. Проблем уклањања лажних решења из 30-зонског прорачуна за ове наноструктуре је размотрен по први пут и успешно решен.

Прстенолике квантне тачке на бази GaAs/(Al,Ga)As и (In,Ga)As/GaAs су интензивно изучаване последњих петнаест година. Једна од потенцијалних примена квантних тачака је квантно рачунарство, јер је честица у квантној тачки релативно слабо спрегнута са околином, па су ефекти квантне декохеренције мали. Такође, квантне тачке се користе за израду ласера, који испољавају више предности у односу на ласере на бази квантних јама: нижу струју прага, нижи ниво шума и мање ширине линија у емисионом спектру. У квантним тачкама које имају топологију прстена јавља се Ахаронов-Бомов ефекат. Ово је квантни интерферентни ефекат који се користи за мерење магнетског поља веома малог интензитета. Потенцијална примена квантних прстенова је за реализацију неизбрисивих меморија базираних на полупроводницима. Међутим, квантни прстенови добијени техником капљичне епитаксије или помоћу Странски-Крастанов раста садрже танак слој материјала унутар

отвора прстена. Једноставан геометријски модел таквих *прстеноликих квантних тачака* је предложен у дисертацији. Размотрен је утицај механичког напрезања на електронска и шупљинска стања у овим квантним тачкама. Показано је да слој унутар отвора прстена има већи утицај на Ахаронов-Бомове осцилације електронских и шупљинских стања у напрегнутим него у ненапрегнутим структурама.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 220 библиографских референци. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, као и радове чији је аутор или коаутор Немања Чукарић.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру приложене докторске дисертације састојала се у следећем:

- детаљно је проучена литература која разматра технике производње квантних јама и квантних тачака; такође је детаљно проучена литература која анализира теоријске моделе електронске структуре и ефекте истражене у дисертацији;
- релевантни резултати објављени у доступној литератури су систематизовани, на основу чега је дефинисана проблематика којом ће се бавити дисертација;
- извршен је преглед релевантних **к-р** модела за прорачун електронске структуре полупроводника са директним и индиректним енергетским процепом;
- за моделовање електронске структуре силицијумских квантних јама коришћен је 30-зонски **к-р** модел. Ова теорија се користи за моделовање електронских и шупљинских стања и адекватан је приступ за наноструктуре сачињене како од директних, тако и од индиректних полупроводника;
- формиран је оригинални алгоритам за уклањање лажних решења, што је омогућило правилну селекцију стања која учествују у међузонским оптичким прелазима;
- диполна апроксимација и временски зависна теорија пертурбација су искоришћене за прорачун међузонске апсорпције;
- електронска структура GaAs/(Al,Ga)As квантних јама моделована је помоћу 30-зонског, једнозонског и 6-зонског **к-р** модела и резултати ових прорачуна су међусобно упоређени. Уз то, 2-зонски модел је искоришћен за процену ефеката Дрезелхаусове спин-орбитне интеракције;
- шупљинска стања у GaAs/(Al,Ga)As квантним тачкама израчуната су помоћу 4-зонског Латинџер-Коновог модела;
- 4-зонски Пикус-Биров формализам је примењен за рачунање шупљинских стања у напрегнутим (In,Ga)As/GaAs квантним тачкама;
- расподела механичког напрезања израчуната је коришћењем апроксимације изотропне еластичности у оквиру континуалног механичког модела еластичности;
- 4-зонски и 6-зонски модели шупљинских стања у квантним тачкама су имплементирани у аксијалној апроксимацији, док су електронска стања моделована помоћу једнозонске Шредингерове једначине.

За нумеричка израчунавања коришћени су следећи методи:

- метод развоја анвелопних функција у полупроводничким квантним јамама у погодном формираном базису  $\sin/\cos$  стојећих таласа;
- анвелопне функције у квантним тачкама развијене су у базису формираном од производа  $\sin/\cos$  стојећих таласа у правцу нормалном на основу квантне тачке и Беселових функција прве врсте у радијалном правцу цилиндричног координатног система;

- развијени програми написани су у програмским језицима C, C#, Fortran и математичком софтверу MATLAB.

Резултати нумеричких прорачуна су упоређени са експерименталним резултатима доступним у литератури. Уочене су предности и недостаци предложених модела и изведени су закључци о њиховој валидности, посебно за моделовање наноструктура.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научноистраживачког рада и довела је до коректних решења проблема дефинисаних у дисертацији. У дисертацији је извршена систематизована и свеобухватна дискусија добијених резултата.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Тема дисертације су прорачуни електронске структуре и оптичких својстава полупроводничких наноструктура. Приказано теоријско разматрање електронских стања, шупљинских стања и оптичких особина силицијумских квантних јама је значајно за реализацију ласера и соларних ћелија на бази ових наноструктура. Резултати дисертације су упоређени са доступним експерименталним подацима и утврђена је конзистентност добијених резултата. Развијени модели су примењени и на квантне јаме на бази III-V једињења. Анализа је показала да 30-зонски модел симетричне квантне јаме даје мање раздвајање нивоа услед Дрезелхаусовог спин-орбитног ефекта у односу на резултате 2-зонског модела, што је значајан резултат за примену квантних јама у спинтроници. Предложени алгоритам за уклањање лажних решења из 30-зонског  $k\cdot p$  прорачуна може се, уз одређене модификације, применити и на друге  $k\cdot p$  моделе. Резултати добијени теоријским разматрањем Ахаронов-Бомовог ефекта у прстеноликим квантним тачкама су у складу са експерименталним резултатима. Ови резултати су добра полазна тачка у разматрању вишечестичних система, као што су ексцитони и триони. На основу резултата дисертације може се одредити спектар оптичке апсорпције и емисије, тако да се наведени резултати могу применити за реализацију нових наноелектронских и фотонских направа.

### 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

Остварени научни доприноси дисертације су:

- увид у порекло лажних решења у 30-зонском  $k\cdot p$  моделу примењеном на Si/SiO<sub>2</sub> квантне јаме;
- формирање ефикасног алгоритма за уклањање лажних решења из енергетског спектра Si/SiO<sub>2</sub> квантне јаме;
- разумевање утицаја ефекта квантног конфинирања и преклапања зона у  $\Gamma$  тачку на спектар међузонске апсорпције у силицијумским квантним јамама;
- оцена тачности једнозонског и 6-зонског  $k\cdot p$  модела коришћених у прорачуну електронских и шупљинских стања GaAs/(Al,Ga)As квантне јаме, при чему су референтни резултати добијени помоћу 30-зонског  $k\cdot p$  модела;

- одређивање ефеката Дрезелхаусове спин-орбитне интеракције на електронску структуру GaAs/(Al,Ga)As квантних јама коришћењем 30-зонског  $k \cdot p$  модела;
- разумевање утицаја слоја унутар номиналног отвора квантних прстенова и мешања зона на Ахаронов-Бомове осцилације шупљинских стања у реалистичним GaAs/(Al,Ga)As квантним прстеновима у магнетском пољу;
- анализа утицаја напрезања и геометрије на електронску структуру (In,Ga)As/GaAs квантних тачака у магнетском пољу;
- нађено је да су добијени резултати у сагласности са експерименталним подацима доступним у литератури и публиковани су у часописима са СЦИ листе.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживање које је кандидат спровео је базирано на савременим теоријским и експерименталним резултатима објављеним у реномираним часописима. Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања која су произашла из рада на дисертацији Систематична примена  $k \cdot p$  модела за рачунање електронске структуре силицијумских квантних јама, GaAs/(Al,Ga)As квантних јама, ненапрегнутих GaAs/(Al,Ga)As квантних тачака и напрегнутих (In,Ga)As/GaAs квантних тачака, као и анализа добијених резултата представљају значајне научне доприносе у области наноелектронике и фотонике, што је верификовано објављивањем резултата истраживања у часописима са СЦИ листе.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације Немања Чукарић је објавио 4 рада у међународним часописима са СЦИ листе. Од тога 3 рада су публикована у часописима категорије M21, а 1 рад у часопису категорије M23. Поред тога, 2 рада су презентована на домаћим конференцијама.

##### Категорија M21:

1. N. A. Čukarić, M. Ž. Tadić, B. Partoens, F. M. Peeters, "The interband optical absorption in silicon quantum wells: Application of the 30-band  $k \cdot p$  model", APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 104, No. 24, 242103 (5 p.), 2014 (IF=3.515) (ISSN 0003-6951) (DOI: 10.1063/1.4884122).
2. N. A. Čukarić, M. Ž. Tadić, B. Partoens, F. M. Peeters, "30-band  $k \cdot p$  model of electron and hole states in silicon quantum wells", PHYSICAL REVIEW B, Vol. 88, No. 20, 205306 (8 p.), 2013 (IF=3.664) (ISSN 1098-0121) (DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205306).
3. N. A. Čukarić, V. Arsoski, M. Tadić, F. Peeters, "Hole states in nanocups in a magnetic field", PHYSICAL REVIEW B, Vol. 85, No. 23, 235425 (11 p.), 2012 (IF=3.767) (ISSN 1098-0121) (DOI: 10.1103/PhysRevB.85.235425).

##### Категорија M23:

1. N. Čukarić, M. Tadić, F. M. Peeters, "Electron and hole states in a quantum ring grown by droplet epitaxy: Influence of the layer inside the ring opening", SUPERLATTICES AND MICROSTRUCTURES, Vol. 48, No. 5, pp. 491-501, 2010 (IF=1.096) (ISSN 0749-6063) (DOI: 10.1016/j.spmi.2010.09.001).

##### Категорија M63:

1. N. A. Čukarić, V. Arsoski, M. Tadić, "Višezonski modeli elektronske strukture provodne zone silicijuma", XII Kongres fizičara Srbije, Vrnjačka Banja, april 2013.
2. N. Čukarić, M. Tadić, "Elektronska struktura nanoprstena na nanotački u magnetskom polju", Zbornik radova LIII Konferencije ETRAN-a, Vrnjačka Banja, MO3.4, jun 2009.



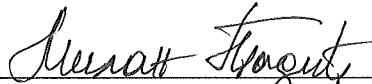
## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација Немање Чукарића, мастер инж. ел. и рач., представља савремен, оригиналан и значајан научни допринос. Предложен је метод прорачуна електронске структуре Si/SiO<sub>2</sub> квантних јама. Проблем лажних решења при одређивању електронских и шупљинских стања 30-зонским *k-p* методом је детаљно размотрен и развијен је алгоритам за њихово уклањање у случају Si/SiO<sub>2</sub> квантне јама. Разматрана је међузонска апсорпција у Si/SiO<sub>2</sub> квантним јамама и показано је да ширина јама има кључан утицај на међузонске прелазе. Добијени резултати показују да 4-зонски и 6-зонски модел дају задовољавајуће резултате за валентну зону у већини разматраних случајева. Коришћење 30-зонског модела је међутим неопходно за одређивање директног процепа у силицијумским квантним јамама и моделовање спинског раздвајања нивоа услед непостојања инверзионе симетрије кристала. Приказан је утицај геометрије, механичког напрезања, мешања зона и магнетског поља на електронску структуру прстеноликих GaAs/(Al,Ga)As и (In,Ga)As/GaAs квантних тачака. Показано је да слој унутар прстенолике квантне тачке има велики утицај на Ахаронов-Бомове осцилације шупљинских стања, посебно у напрегнутим структурама. Добијени резултати имају значајну примену у наноелектроници и фотоници. Оригиналноост и валидност резултата дисертације потврђени су објављивањем више радова кандидата у релевантним часописима са СЦИ листе.

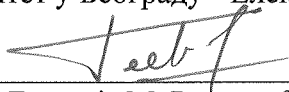
На основу претходног, Комисија за преглед и оцену докторске дисертације констатује да је Немања Чукарић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, те са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се дисертација под насловом „*Моделовање електронских и шупљинских стања у полупроводничким наноструктурама помоћу вишезонске k-p теорије*” (“*Modelling the electron and hole states in semiconductor nanostructures by the multiband k-p theory*”) кандидата Немање Чукарића 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



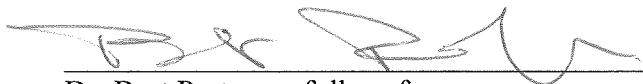
Др Милан Тадић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



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



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



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



Др Владимир Арсоски, доцент  
Универзитет у Београду-Електротехнички факултет