

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **мр Александра Сремца** за израду докторске дисертације

Одлуком бр.961/1 од 30.06.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Александра Сремца за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „**Моделовање система нанотачака за детекцију инфрацрвене светлости**“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александар Сремац је рођен 03. маја 1978. године у Београду. Математичку гимназију је завршио 1997. године, а затим је уписао Електротехнички факултет у Београду и дипломирао 2005. године на Одсеку за физичку електронику, смер за оптоелектронику и ласерску технику. Постдипломске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Физика и техника плазме и чврстог тела, уписао је 2005. године. Положио је све испите са просечном оценом 10 и одбранио магистарски рад 2014. године на тему „Оптички прелази у аксијално симетричним нанотачкама у магнетском пољу“. Аутор је два рада презентована на скуповима ТЕЛФОР и ЕТРАН.

Од јуна 2007. године запослен је у РАТЕЛ-у (Регулаторна агенција за електронске комуникације и поштанске услуге) као саветник, а од 2013. године као виши саветник на пословима контроле електронских мрежа и услуга. Течно говори енглески језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је одбранио магистарски рад „Оптички прелази у аксијално симетричним нанотачкама у магнетском пољу“ код ментора професора др Милана Тадића 24.06.2014. на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду. У магистарском раду су разматране ненапрегнуте струкутуре нанодискова и нанпорстенова, као и два вертикално спрегнута нанодиска и нанопрстена на бази GaAs/(Al,Ga)As. Електронска структура је моделована помоћу теорије анвелопних функција у апроксимацији ефективних маса. За нумеричко решавање Шредингерове једначине коришћена је метода развоја таласне функције у базис

Беселових функција дуж радијалне координате и стојећих таласа дуж аксијалне координате цилиндричног координатног система. Резултати овог модела, када се примене на изоловану квантну тачку, упоређени су са резултатима који се добијају применом адијабатске апроксимације.

Модел унутарзонских и међузонских прелаза је разматран у диполној апроксимацији. Анализиран је утицај магнетског поља на оптичке апсорпционе спектре. Утврђено је да се апсорпциони максимуми померају ка плавој области спектра са повећањем магнетског поља. У спектру међузонске апсорпције установљен је већи број линија у односу на спектар унутарзонске апсорпције, што овај механизам чини повољним за примену у вишебојним фотодетекторима.

Разлике у димензијама нанотачака у ансамблу укључени су кроз нехомогено ширење апсорпционе линије. У случају када су разлике димензија тачака мале, линија је мало проширена, те је могућа контрола енергије прелаза применом магнетског поља. Међутим, у случају значајније варијације димензија тачака, односно велико нехомогено ширење, постоји слаба зависност спектра апсорпције за унутарзонске и међузонске прелазе од магнетског поља.

Кандидат је објавио два рада на конференцијама, која су штампана у зборницима у целини:

M33 – саопштења са међународних скупова штампана у целини

1. Sremac, M. Živković, M. Tadić, *Optoelectronic properties of GaAs quantum rings*, - Proceedings of 12th IEEE Telecommunications Forum Telfor 2004, Belgrade, Serbia, November 2004, paper OT-8-5.

M63 – саопштења са домаћих скупова штампана у целини

1. A. Sremac, M. Živković, M. Tadić, *Međuzonska apsorpcija i pojačanje svetlosti u kvantnom prstenu*, Zbornik radova 49. Konferencije za ETRAN, Budva, tom IV, 5-10 juna 2005., pp. 258-261.

У припреми је рад из области докторске дисертације, од којег се очекује да буде публикован у међународном часопису.

Кандидат је дана 1. јула 2015. полагао докторски испит на Електротехничком факултету у Београду, при чему је комисија у саставу:

- др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (председник),
- др Небојша Ромчевић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику и
- др Радивоје Ђурић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

једногласно закључила да су кандидат и тема подобни за израду докторске дисертације на Универзитету у Београду – Електротехничком факултету.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата приказаних у магистарској тези и радовима презентованим на конференцијама, који обухватају тематику везану за квантне тачке и нумеричку симулацију њихових електронских и оптичких особина, може се закључити да је кандидат способан и квалификован да приступи изради докторске дисертације на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Последње деценије постоји пораст интересовања за системе базиране на нанотачкама (квантним тачкама), због њихове перспективне примене у наноелектроници, квантним информационим технологијама и фотоници. Једна од најсавременијих направа за детекцију зрачења у инфрацрвеној области светлосног спектра су детектори на бази квантних јама (енгл: *quantum well infrared photodetector*- QWIP), где постоји конфинирање носилаца само у једном правцу. Услед селекционих правила овакви детектори могу бити неосетљиви за светлост одређене поларизације. На пример, унутарзонски прелази код инфрацрвених фотодетектора *n*-типа на бази квантних јама (дводимензиони електронски гас) су дозвољени само када је поларизација инцидентног зрачења нормална на правац нарасле структуре. С друге стране, кретање носилаца наелектрисања у квантним тачкама је ограничено у сва три просторна правца (нултодимензиони електронски гас), што ствара услове за апсорпцију произвољно поларизованог зрачења [1].

Код квантних јама конфинирање постоји само у правцу нарастања структуре, док је спектар енергија континуалан у равни структуре и у одређеним опсезима поклапа се са спектром енергија лонгитудиналних оптичких (ЛО) фонона. То је разлог за значајну вероватноћу термалне генерације-рекомбинације при електрон-фонон интеракцији са временом живота реда пикосекунде. Услед конфинирања носилаца у сва три просторна правца у нанотачкама, процес ексцитације у интеракцији са фононима могућ је само ако је разлика енергија дискретних стања система једнака енергији фонона. Стога је вероватноћа термалне генерације електрона веома мала, док је време живота електрона у побуђеном стању реда наносекунде (ns). Тако је код међузонских прелаза време живота доминантно одређено интеракцијом електрон-шупљина. На основу претходног може се закључити да инфрацрвени фотодетектори засновани на квантним тачкама (енгл: *quantum dot infrared photodetector* - QDIP) имају мању позадинску струју и мање су осетљиви на температурне промене од QWIP-ова [2,3,4].

У циљу постизања задовољавајућег струјног одзива на инцидентно зрачење, при производњи QDIP-ова формира се матрица квантних тачака на површини супстрата, код којих практично не постоји латерално спрезање. Доминантна техника за производњу површински уређених структура квантних тачака у претходној деценији је Странски-Крастанов мод епитаксијалног раста напрегнутих структура [5]. Основни предуслов за ову технику је непоклапање константи решетке материјала супстрата и нарастајућег слоја, што доводи до механичког напрезања. Код квантних тачака произведених овим методом постоји приметна варијација димензија у ансамблу. Ово доводи до релативно великог нехомогеног ширења, те и до смањења коефицијента апсорпције. На овај начин, теоријска предвиђања модела заснованог на анализи изоловане квантне тачке тачно одређених димензија уз претпоставку идентичних димензија квантних тачака у ансамблу дају много веће вредности квантне ефикасности од експериментално добијених резултата. Једна од техника која смањује нехомогено ширење је вертикално спрезање слојева квантних тачака. У овој техници формиран ансамбл квантних тачака се прекрива слојем материјала супстрата (покривни слој). Напрезање доводи до раста нанотачака у наредном слоју, а ансамбл квантних тачака приближно истих димензија нараста на површини уколико је дебљина покривног слоја мала. Међутим, ово може довести до пораста позадинске струје, јер расте вероватноћа тунеловања између суседних слојева квантних тачака [4]. С друге стране, техником модификоване капљичне епитаксије за фабрикацију система квантних тачака без присутног напрезања [6] могу се произвести ансамбли нанотачака који имају велику униформност димензија и састава, те се могу реализовати детектори са веома уском линијом у апсорпционом спектру. У данашње време могуће је произвести разноврсне системе квантних тачака, веома прецизно дефинисаних нанометарских димензија, са малим бројем дефеката, при чему је технолошки процес

производње веома поуздан и репродуктиван. Такође, најновије технике наноманипулације и нанолитографије омогућавају у перспективи производњу скоро идентичних нанодимензионих структура, што ће у будућности довести до реализације фотодетектора на бази нанотачака супериорних особина за детекцију у односу на детекторе на бази квантних јама.

Електронске и оптичке особине наноструктура одређене су саставом и морфологијом наноструктуре. Адекватним избором материјала, димензија и облика нанотачака, могуће је дизајнирати структуру која има жељени енергетски спектар у складу са применом за детекцију инцидентног зрачења у одређеној области спектра [7]. Добијене структуре имају различите морфологије, што се не односи само на облик квантне тачке, већ и на могућност реализације комплексних система вертикално [8] и/или латерално спрегнутих нанотачака [9]. Како се облик произведене квантне тачке технолошки много теже може контролисати [9] од вертикалног растојања слојева квантних тачака [8], системи вертикално спрегнутих тачака све више добијају на значају у односу на латерално спрегнуте једнослојне структуре. Такође, у вишеслојним структурама добија се већи струјни одзив услед повећања апсорпције.

Досадашња истраживања унутарзонске апсорпције везана су претежно за стања у проводној зони. Скорашња експериментална и теоријска анализа указује на могућност реализације QDIP-ова p -типа, заснованих на прелазима шупљина у валентној зони, који могу имати значајно већу квантну ефикасност у односу на еквивалентне системе QDIP-ова n -типа [10].

Познато је да на енергије прелаза и матричне елементе прелаза утиче примена било електричног било магнетског поља. Последњих година од посебног су интереса системи базирани на слоју квантних тачака у комбинацији са резонантном тунелском направом на бази квантне јаме [11]. Добијени резултати указују на могућност реализације направе код које би се интензитет максимума апсорпције контролисао применом екстерног електричног поља, односно, изменом напона поларизације направе. На овај начин могу се реализовати вишебојни детектори помоћу мањег броја слојева квантних тачака. Ипак, много финије подешавање пика апсорпције може се остварити применом екстерног магнетског поља примењеног нормално на раван слоја квантних тачака. Први резултати кандидата указују на могућност контроле положаја апсорпционог пика променом интензитета поља магнетске индукције. Утицај магнетског поља на положај апсорпционог опсега ефикаснији је у системима где постоји велика униформност димензија квантних тачака, а самим тим и мало нехомогено ширење апсорпционе линије, што је случај ненапрегнутих система добијених помоћу модификоване капљичне епитаксије [6].

Циљ дисертације је анализа електронске структуре и оптичких прелаза у системима нанотачака, при чему ће посебно бити размотрени и нанопрстенови. Биће формиран модели електронске структуре проводне и валентне зоне ових структура. Поред тога, биће формиран модели унутарзонских и међузонских прелаза, у циљу анализе оптичких особина ових наноструктура. Модели ће обухватити анализу изолованих и спрегнутих нанотачака и нанопрстенова у спољашњем електричном и спољашњем магнетском пољу. Очекује се да ће развијени модели омогућити добру квалитативну и квантитативну анализу постојећих и предвиђање потенцијалних, технолошки изводљивих наноструктура за QDIP-ове.

[1] P. Martyniuk, A. Rogalski, *Quantum-dot infrared photodetectors: Status and outlook*, Progress in Quantum Electronics 32, pp. 89–120 (2008).

[2] S. Krishna, J.S. Tyo, M.H. Hayat, S. Raghavan, U. Sakoglu, *Detector With Tunable Spectral Response*, US Patent Application No. US 2007/0252134 A1 (2007).

- [3] A.V. Barve, S.J. Lee, S.K. Noh, and S. Krishna, *Review of current progress in quantum dot infrared photodetectors*, Laser & Photonics Review, 1–13 (2009).
- [4] P. Martyniuk, A. Rogalski, *Insight into performance of quantum dot infrared photodetectors*, Bulletin of the Polish Academy of Science-Technical Sciences 57, pp.103-116 (2009).
- [5] E.T. Kim, Z. Chen, and A. Madhukar, *Tailoring detection bands of InAs quantum-dot infrared photodetectors using $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ strain-relieving quantum wells*, Applied Physics Letters 79, pp.3341-3343 (2001).
- [6] Watanabe K., N. Koguchi, and Y. Gotoh, *Fabrication of GaAs Quantum Dots by Modified Droplet Epitaxy*, Japanese Journal of Applied Physics 39, L79 (2000).
- [7] S. Kabi, A. G. Unil Perera, *Effect of quantum dot size and size distribution on the intersublevel transitions and absorption coefficients of III-V semiconductor quantum dot*, Journal of Applied Physics 117, 124303 (2015).
- [8] S. Shetty, S. Adhikary, B. Tongbram, A. Ahmad, H. Ghadi, S. Chakrabarti, *The optical properties of strain-coupled InAs/GaAs quantum-dot heterostructures with varying thicknesses of GaAs and InGaAs spacer layers*, Journal of Luminescence 158, 231–235 (2015).
- [9] J. Wu, Z. Li, D. Shao, M.O. Manasreh, V.P. Kunets, Z.M. Wang, G.J. Salamo, and B.D. Weaver, *Multicolor photodetector based on GaAs quantum rings grown by droplet epitaxy*, Applied Physics Letters 94, 171102 (2009).
- [10] Y.F. Lao, S. Wolde, A.G. Unil Perera, Y.H. Zhang, T.M. Wang, H.C. Liu, J.O. Kim, T. Schuler-Sandy, Z.B. Tian, and S.S. Krishna, *InAs/GaAs p-type quantum dot infrared photodetector with higher efficiency*, Applied Physics Letters 103, 241115 (2013).
- [11] J. Huang, W. Ma, Y. Wei, Y. Zhang, Y. Huo, K. Cui, and L. Chen, *Two-color $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ quantum dot infrared photodetector with double tunneling barriers*, Applied Physics Letters 98, 103501 (2011).

3. Полазне хипотезе

Код анализираних ансамбала квантних тачака постоји слабо међусобно спрезање у равни. Ово омогућава да се анализа електронске структуре и оптичких прелаза поједностави на анализу појединачних или вертикално јако спрегнутих нанотачака и нанопрстенова. Сматра се да су димензије нанотачака довољно велике, те да теорија анвелопних функција даје задовољавајуће резултате.

Материјали за израду QDIP-ова имају релативно велики енергетски процеп тако да се спрезање проводне и валентне зоне може занемарити. Такође, маса тешких шупљина је много већа од масе лаких шупљина, те се у првој апроксимацији код анализе међузонских прелаза сматра да тешкошупљински екситон има значајно мању вредност енергије од лакошупљинског. Стога, примена једнозонског модела у сферној апроксимацији даје задовољавајуће резултате.

Претпоставља се да је вероватноћа термалне емисије занемарљива, те да је доминантан механизам релаксације електрона код међузонске апсорције последица електрон-шупљина интеракције. Ширење линије оптичког прелаза услед разлике у димензијама тачака у ансамблу уводи се феноменолошки на основу експериментално одређених вредности. Нехомогено ширење линије је моделовано помоћу Гаусове криве, при чему је ширина линије бар за ред величине мања од оне код инфрацрвених детектора на бази квантних јама, што је у складу са експерименталним резултатима.

4. Научне методе истраживања

За прорачун електронске структуре користиће се једнозонски модел стања у проводној зони, док ће стања у валентној зони бити моделована у оквиру сферне апроксимације вишезонског модела. Биће анализиран утицај електричног и магнетског поља на електронску структуру. За прорачун својствених вредности и функција користиће се теорија анвелопних функција. Анализираће се нанотачке облика диска и нанопрстенови облика торуса. Електронска структура ће бити одређена помоћу метода експанзије у базис аналитичких функција и то Беселових функција за компоненту у радијалном правцу и синуса и косинуса за компоненту у правцу z -осе. У случају сложене геометрије нанотачака и нанопрстенова за решавање Шредингерове једначине користиће се метод коначних елемената.

У циљу анализе спектра апсорпције биће израчунати коефицијенти апсорпције у диполној апроксимацији. Разматраће се унутарзонски и међузонски прелази. У оквиру теоријског дела биће изведена селекциона правила за оба механизма апсорпције.

За нумерички прорачун биће написани кодови у програмском језику FORTRAN. Добијени резултати биће упоређени са експерименталним резултатима из референтне литературе (скорашњи радови са СЦИ листе).

5. Очекивани научни допринос

- Свеобухватни преглед достигнућа у области фотодетектора на бази квантних тачака
- Имплементација теоријског модела електронске структуре ансамбла квантних тачака у електричном и магнетском пољу
- Имплементација теоријског модела спектра апсорпције
- Анализа система квантних тачака различитог састава и облика за примену у инфрацрвеним фотодетекторима
- Одређивање оптималних димензионих параметара идеализованих и реалистичних система квантних тачака за подешавање апсорпционог опсега
- Одређивање оптималног растојања између слојева, као и оптималног броја слојева вертикално спрегнутих квантних тачака
- Испитивање могућности подешавања апсорпционог опсега помоћу спољашњег магнетског поља.

6. План истраживања и структура рада

- Преглед литературе референтне за фундаменталне теоријске моделе електронске структуре и оптичких прелаза, као и преглед експерименталних резултата везаних за реализоване фотодетекторе на бази квантних тачака.
- Имплементација теоријских модела у виду програмског кода и нумеричка симулација за одабране параметре који одговарају скорашњим експерименталним мерењима
- Публиковање радова из области тезе у референтним часописима са СЦИ листе
- Израда докторске дисертације у којој ће бити приказан свеобухватни преглед достигнућа из области инфрацрвених детектора на бази квантних тачака, резултати истраживања кандидата уз истицање научних доприноса, као и визија развоја и праваца истраживања у предметној области.

7. Закључак и предлог

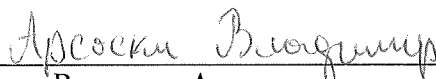
На основу изложеног Комисија констатује да мр Александар Сремац, дипл. инж. електротехнике, испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације под насловом „Моделовање система нанотачака за детекцију инфрацрвене светлости“. Поред испуњености формалних услова, кандидат је показао способност за тимски рад, али и да самостално решава проблеме теоријске анализе и нумеричке симулације сложених система нанотачака, као и да критички анализира добијене резултате.

Предложена тема дисертације припада ужој научној области физичке електронике и научно је заснована. Анализа која ће бити спроведена је од значаја за моделовање перформанси и развој нових изведби инфрацрвених фотодетектора базираних на квантним тачкама, са могућношћу подешавања спектра апсорпције за одређену намену.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да одобри мр Александру Сремцу израду докторске дисертације под насловом „Моделовање система нанотачака за детекцију инфрацрвене светлости“, под руководством др Владимира Арског, доцента Електротехничког факултета Универзитета у Београду и др Милана Тадића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Београд, 02.07.2015.год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



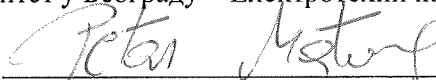
др Владимир Арсоки, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



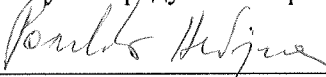
др Милан Тадић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Петар Матавуљ, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Небојша Ромчевић, научни саветник

Универзитет у Београду – Институт за физику



др Радивоје Ђурић, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет