

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

| I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ |
|--|
| <p>1. Датум и орган који је именовao комисију Решење бр. 012-199/32-2015 од 07.07.2016., декан Факултета техничких наука Наставно-научно веће Факултета техничких наука</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен: др Љиљана Живанов, редовни професор, УНО Електроника, 01.10.2000., Факултет техничких наука, Нови Сад др Зоран Јакшић, научни саветник, УНО Микроелектроника, 31.05.2006., Институт за хемију, технологију и металургију, Београд др Станиша Даутовић, доцент, УНО Теоријска електротехника, 02.06.2015., Факултет техничких наука, Нови Сад др Миљко Сатарих, редовни професор, УНО Физика, 12.06.1995., Факултет техничких наука, Нови Сад др Горан Стојановић, редовни професор, УНО Електроника, 21.10.2015., Факултет техничких наука, Нови Сад</p> |
| II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ |
| <p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Наташа, Миленко, Самарцић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 29. мај 1986., Нови Сад, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Факултет техничких наука, Енергетика, електроника и телекомуникације дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства-мастер</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2010. Енергетика, електроника и телекомуникације</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: нема</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: нема</p> |
| III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ: |
| <p>Анализа квантних механизма транспорта присутних у мемристивним уређајима на бази наноматеријала</p> |

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација написана је на 150 страна. Садржи 9 поглавља, 2 табела, 43 слике и 160 навода литературе. Кључна документација написана је на српском и енглеском језику.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
 2. Предмет, проблем и циљ истраживања
 3. Преглед стања у области
 4. Теоријски модели
 5. Материјали и методе
 6. Физичка реализација мемристивних узорака
 7. Резултати и дискусија
 8. О применама реализованих мемристора
 9. Закључак
- Додатак
Литература

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У дисертацији “Анализа квантних механизма транспорта присутних у мемристивним уређајима на бази наноматеријала” развијене су три класе мемристора: резистивни прекидачки TiO_2 мемристор на бази редокс реакција, фероелектрични и мултифероични мемристор. Експериментално су испитане електричне и структуралне карактеристике узорака. Идентификовани су постојећи модели транспорта носилаца у структурама. Тако је за редокс тип мемристора доминантан балистички транспорт кроз нанометарски проводни филамент формиран у активном материјалу, преко ког се објашњава присутан ефекат квантизације проводности. Проводни филамент се претходно формира линеарним јонским дрефтом носилаца у материјалу. За фероелектричне и мултифероичне мемристоре, идентификовани су ефекти пољем индукованог тунеловања и термичка Шотки емисија, који се смењују у зависности од јачине поља и радне температуре.

У уводном поглављу укратко је описана мотивација за тему истраживања докторске дисертације. Наводе се зачеци теоријског и експерименталног истраживања из области мемристора, као и позиција резултата представљених у дисертацији са постојећим научним токовима из области. У поглављу је дефинисана и организациона структура текста дисертације.

Предмет, проблем и циљ истраживања су описани у другом поглављу. Предмет истраживања обухвата фабриковање мемристора у доступним нискобуџетским технологијама, испитивање и идентификовање ефеката квантизације проводности код мемристора редокс типа као и идентификовање физичких механизма одговорних за мемристивни ефекат у фероелектричним и мултифероичним мемристорима. Истраживања су усмерена на проналажење оптималних фабрикационих услова и интерпретацију експерименталних резултата као и моделовање електричних карактеристика мемристора. Основни циљеви истраживања су: поновљива фабрикација, електрична и структурална анализа, затим анализа, моделовање и поређење експерименталних резултата са физичким моделима преноса носилаца у нанометарским филмовима.

Треће поглавље садржи преглед стања у области са поделом типова мемристора. Детаљније се разматрају оне класе мемристора, у чију групу спадају узорци фабриковани у оквиру дисертације. Описују се материјали и системи, са изразитим мемристивним ефектом, наводе се примери из литературе главних представника појединачних класа мемристора са специфичностима датих структура. Додатно се разматрају физички модели за опис струјно-напонских релација у појединим мемристивним системима.

Теоријски модели, који се примењује за интерпретацију и дискусију резултата, су описани у поглављу четири. С обзиром да се у дисертацији, разматрају три класе мемристора: мемристор на бази промене валенце, фероелектрични и мултифероични тип, за сваки појединачно се описују присутни физички ефекти уз одговарајуће математичке моделе и релације. За мемристоре са променом валенце, користи се модел јонског дрефта у активном TiO_2 слоју, којим се описује прерасподела носилаца у структури и формирање проводног филамента. Услед нанометарских димензија филамента, након његовог формирања у појединим деловима прекидачког струјно-напонског циклуса идентификује се ефекат квантизације проводности. Тај ефекат се приписује балистичком транспорту кроз филамент и описује Ландауеровом теоријом (трансмисиони формализам). Фероелектрични и вишеслојни мултифероични филмови у својој структури поседују спојеве метал-фероелектрик који може утицати на струјно-напонске карактеристике преко следећих ефеката: Шотки емисија, Пул-Френкел транспортни механизам, Фаулер-Нордхајмово тунеловање, струје ограничене просторним наелектрисањем и директно тунеловање кроз фероелектрични филм. У поглављу четири наводи се Симонсов модел тунеловања, који аналитички и нумерички обједињује претходне ефекте и наводе се методе за разграничавање дејства тих ефеката у мемристивним материјалима.

Опис материјала за фабрикацију, као и методе (електричне и структуралне) за испитивање карактеристика узорака су наведени у поглављу пет. Кристалографска структура се испитује методом дифракције рендгенским зрацима, а микрографски снимци скенирајућом електронском микроскопијом. Анализа електричних особина врши се мерењем струјно-напонских карактеристика као и мерење импедансе у функцији фреквенције, анализатором импедансе.

Детаљан опис фабрикационог процеса за добијање инк-џет штампаног мемристора наведен је у шестом поглављу. Објашњене су методе за оптимизацију процеса штампе, у циљу добијања равномерних слојева активног материјала (TiO_2). Наводе се специфичности инк-џет штампане технологије и на који начин су прилагођени улазни параметри за остваривање поновљивог и стабилног тока мастила из млазница. Поред тога, представљени су структурални резултати анализе узорака (TiO_2 мемристора, фероелектричног мемристора и мултифероичног мемристора) са идентификацијом присутних фаза у материјалу (дифракција рентгенским зрацима), као и микрографски и профилометријски снимци попречних пресека и површина узорака.

Седмо поглавље садржи најважније резултате докторске дисертације, као и њихову дискусију. Подељено је у три потпоглавља посвећених појединачним типовима мемристора. За редокс TiO_2 тип мемристора (или мемристор на бази промене валенце), представљени су резултати струјно-напонских карактеристика при различитом поларитету, амплитуди и фреквенцији побудног импулса. Ови мемристор су показали добру поновљивост високоотпорног и нискоотпорног меморијског стања, могућност униполарног прекидачког ефекта, као и уштинуту хистерезисну петљу за различите амплитуде побудног напона, што је погодна карактеристика, за меморијске уређаје који треба да очувају више стања у оквиру исте компоненте (*engl. multi-level switching*). Надаље, представљене су импедансне карактеристике и вредности транспортних параметара TiO_2 слоја, преко којих су разграничени утицаји зрна и граница зрна у материјалу. На електричним карактеристикама се појављују платои елементарне квантне проводности. Њихови одзиви се статистички обрађују преко хистограма и интерпретирају коришћењем теоријског модела, из главе 4. Фероелектрични и мултифероични мемристор се такође карактеришу струјно-напонским и импедансним мерењима. Мемристивни прекидачки ефекат код мемристора фероелектричног типа се интерпретира преко модификације висине баријере метал-фероелектрик, под дејством поља за поларизацију. Поменута модификација условљава промену проводности материјала (BaTiO_3), при промени поларитета побудног напона. Одзив је стабилан и поновљив, а приказани су и назмични циклуси читања и уписа у фероелектричну меморијску ћелију. Надаље вишеслојна структура $\text{BaTiO}_3/\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ између металних електрода, сачињава мемристивни систем мултифероичног типа. Комбиновано дејство фероелектричних и феромагнетских својстава побољшава симетрију струјно-напонског одзива, у поређењу са претходне две класе. Идентификовани транспортни механизми за овај систем су пољем индуквано тунеловање и термичка емисија, који се смењују у зависности од јачине примењеног поља и температурних

услова.

Осмо поглавље наводи могуће примене реализованих мемристора у сензорици и биоелектроници. Приказана је зависност отпорности мултифероичног мемристора од температуре у опсегу од 400 K-470 K, при ком је на снази термичка емисија и размотрене су особине температурних сензора на бази мемристора. Надаље се испитује промена одзива мемристора услед фотонске побуде као и одзив фероелектричног мемристора на сукцесивну униполарну троугаону напонску побуду, који се у литератури пореди са дугорочним потенцирањем синапси и отвара могућност примене мемристора у биоелектроници.

У деветом поглављу дати су закључци и наведени научни доприноси дисертације, као и смернице за даљи рад у области.

Поглавље литература садржи 160 навода коришћене литературе, која је савремена и правилно одабрана према захтевима разматране теме.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Рад у врхунском међународном часопису (M21)

1. **N. Samardžić**, M. Mionić, B. Dakić, H. Hofmann, S. Dautović, G. Stojanović, “Analysis of Quantized Electrical Characteristics of Microscale TiO₂ Ink-jet Printed Memristor”, IEEE Trans. Electron Devices, (IF: 2.358), vol. 62, no. 6, pp. 1898-1904, 2015, ISSN: 0018-9383.

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **N. Samardžić**, T. Kojic, J. Vukmirovic, Dj. Trpikovic, B. Bajac, V. Srdic, G. Stojanovic, “Performance analysis of resistive switching devices based on BaTiO₃ thin films”, 5th International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers, IC-MAST, Mykonos, Greece, September 2015.

2. L. Gambuzza, **N. Samardžić**, S. Dautović, M. Xibilia, S. Graziani, L. Fortuna, G. Stojanović, M. Frasca, “A data driven model of TiO₂ printed memristors”, 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO2013), pp. 1-4, November 28-30, 2013, Bursa, Turkey.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

1. **N. Samardžić**, G. Stojanović, D. Damjanović, H. Hofmann и M. Mionić Ebersold, “*Fabrication and characterization of ink-jet printed TiO₂ based memristors*“, FEMS Junior Euromat 2016, July 10-14, 2016, Lausanne, Switzerland.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Након успешне реализације различитих мемристивних елемената, доступним технологијама за фабрикацију наноелектронских уређаја, акценат је стављен на електричне карактеристике мемристивних структура као и на механизме транспорта који се јављају у датим системима. Титанијум диоксидни мемристор је пример филаментарне класе резистивних прекидачких меморија, где се формира редукована Магнели фаза TiO₂ као проводни канал нанометарских димензија. Просторна ограничења у нанометарском каналу доводе до ефекта квантизације

проводности, где се проводност манифестује као умножак елементарне проводности.

Мемристорни фероелектричног типа показују глатку струјно-напонску карактеристику са израженом несиметријом позитивног и негативног дела хистерезиса. Ефекат термичке емисије је на собној температури доминантан на нижим вредностима напона ($<2.5\text{ V}$), док за веће вредности напона доминира ефекат Фаулер-Нордхајмовог тунеловања, или тунеловања индукованог електричним пољем. Носиоци пролазе кроз потенцијалну баријеру чија се ширина смањује са јачином поља. Напонска граница дејства термичке емисије се помера ка вишим напонима, када се узорак изложи већим температурама од собне. За анализу импедансног одзива се користи модел, који узима у обзир карактеристике зрна и границе зрна у материјалу. За фероелектрични тип мемристора, потенцирају се предности, веће стабилности одзива, већа разлика ON/OFF стања и већа поузданост система.

Мултифероични мемристорни су такође обећавајући тип резистивних прекидачких меморија из разлога што у комбинацији електричног и магнетског уређења могу да формирају четири различита резистивна стања у оквиру истог узорка/меморијске ћелије. Показано је да је механизам транспорта носилаца интерфејс-типа, тј. баријера на споју метал-фероелектрик диктира јачину струје, а спој фероелектрик-феромагнетик поспешује симетрију одзива. Анализа импедансе за ове системе се објашњава *Maxwell-Wagner* поларизацијом, тј. формирањем области осиромашења на спојевима фероелектрични филм-електрода и фероелектрични филм- феромагнетски филм.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Тумачење добијених резултата је јасно и прегледно. Формирани закључци у раду су поткрепљени одговарајућим теоријским анализама и резултатима мерења, добијеним из сопствених експерименталних истраживања. Резултати су приказани исцрпно и прегледно, уз навођење претходних истраживачких резултата у овој области.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Дисертација садржи све битне елементе.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

У дисертацији су представљене три нове мемристивне структуре. Успешно је, по први пут коришћена и оптимизована инк-цет штампана технологија за фабрикацију редокс мемристора. Ова класа елемената може имати филаментарни тип провођења који у неким системима доводи до дискретизације проводности. Ефекат квантизације проводности је први пут идентификован за TiO_2 мемристоре, у оквиру истраживања представљених у овој дисертације, што чини један од главних доприноса. Ефекат се моделује комбинацијом јонског дрифта за формирање филамента и балистичког транспорта кроз филамент. Надаље су представљене карактеристике нове класе мултифероичног мемристора са активним слојевима $\text{BaTiO}_3/\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$, који до сада није постојао у литератури. Разложени су проводни механизми овог система (Фаулер-Нордхајмово тунеловање и термичка емисија) и екстраховане физичке величине на основу модела који добро описују поменуте ефекте.

Резултати дисертације су објављени у међународним часопису са импакт фактором и саопштени на међународним скуповима, што потврђује оригинални допринос дисертације науци.

| | |
|----------|--|
| 4. | Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања Дисертација нема битне недостатке који утичу на резултате истраживања |
| X | ПРЕДЛОГ: |
| | На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже: |
| - | да се докторска дисертација Наташе Самарџић, под називом “Анализа квантних механизма транспорта присутних у мемристивним уређајима на бази наноматеријала” прихвати, а кандидату одобри одбрана. |

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Др Љиљана Живанов, редовни професор, ФТН,
Нови Сад, председник комисије

Др Зоран Јакшић, научни саветник,
ИХТМ, Београд, члан

Др Станиша Даутовић, доцент,
ФТН, Нови Сад, члан

Др Миљко Сатарић, редовни професор,
ФТН, Нови Сад, члан

Др Горан Стојановић, редовни професор,
ФТН, Нови Сад, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.