

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Ивана Кнежевића за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5042/08/2 од 6.11.2012. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Ивана Кнежевића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме "Радијациона отпорност резистивних постојаних меморија".

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Иван Кнежевић је рођен 05.01.1984. године у Чачку. Основну школу и Прву београдску гимназију, природно-математички смер, завршио је у Београду, обе са Вуковом дипломом и звањем Ђака генерације. Електротехнички факултет у Београду је уписао 2003. године. Основне студије на одсеку за Физичку електронику, смер Биомедицински и еколошки инжењеринг, завршио је 2007. године, са просечном оценом 9,49. Дипломски рад под називом "Заштита од зрачења код примене ^{131}I у терапији карцинома штитасте жлезде" је одбранио под менторством проф. Предрага Осмокровића, са оценом 10. Мастер судије на истом смеру је завршио 2008. године, са просечном оценом 10,00. Мастер рад под називом "Интеракција нејонизујућег зрачења екстремно ниских фреквенција са живом материјом" је одбранио под менторством проф. Предрага Осмокровића, са оценом 10. Школске 2008/2009 је уписао докторске студије на студијском подручју Нуклеарна, медицинска и еколошка техника, где је положио све испите са просечном оценом 10,00 и одрадио све обавезе предвиђене наставим програмом докторских студија за прве две године.

Од септембра 2008. године ради у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине Института за нуклеарне науке "Винча" као инжењер за заштиту од зрачења. У фебруару 2009. године завршава 182. Специјални курс заштите од јонизујућих зрачења под називом "Мере радијационе и нуклеарне сигурности у Институту Винча", а од новембра 2009. добија посао у Јавном предузећу "Нуклеарни објекти Србије" као инжењер за испитивање радиоактивности. У јулу 2010. завршава обуку на "Националном курсу о сигурном и безбедном отпремању истрошеног нуклеарног горива из Републике Србије у Руску Федерацију". Бива ангажован на препакивању и транспорту озраченог нуклеарног горива из истраживачког реактора РА у Винчи у Руску Федерацију, где врши мониторинг

радиолошких параметара радне средине као руководиоца сменског особља. Ради на испитивању интеракције зрачења са различитим врстама и типовима материјала и одређивању специфичне активности и дозиметријских величина. Учествује у изради Програма за систематско испитивање радиоактивности у околини нуклеарног објекта. Испитује и врши мерења специфичне активности одређених радионуклида у узорцима воде, ваздуха, земље, биљака приликом радиолошког мониторинга животне средине. Гамаспектрометријски анализира биолошке узорке професионално изложених лица, и као први аутор презентује радове дате проблематике на домаћим конференцијама. На регионалном скупу 2011. године у организацији Међународне агенције за атомску енергију под називом "Regional Workshop on Operational Radiation Protection Programme and Waste Management Programmes for Research Reactors" у Турској представља земљу као оператор нуклеарног објекта и држи националну презентацију у вези са радијационом сигурношћу и управљањем радиоактивним отпадом на сајту Института Винча од настанка па до данас. Учествује у изради Коначног извештаја о нуклеарној сигурности за привремено складиште радиоактивног отпада ХЗ и безбедно складиште радиоактивних извора БС. У марту 2011. године у Србији завршава обуку фирме RadPro International из Немачке за термолуминисцентну дозиметрију, а у мају исте године обуку за оптички стимулисану дозиметрију, у фирми Landaueг у Паризу. Са тимом сарадника учествује у акредитовању метода лабораторије за испитивање Јавног предузећа према стандарду ISO/IEC 17025.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Кандидат Иван Кнежевић је током докторских академских студија положио испите из следећих предмета:

Р.бр.	Назив предмета	Оцена	ЕПСБ
1.	Простирање оптичких таласа у комплексним срединама	10 (десет)	9
2.	Мерење јонизујућег и нејонизујућег зрачења	10 (десет)	9
3.	Мерне методе у нуклеарној, медицинској и еколошкој техници	10 (десет)	9
4.	Дозиметрија, заштита од зрачења и нуклеарни отпад	10 (десет)	9
5.	Одабрана поглавља из нуклеарне физике	10 (десет)	9
6.	Радијациона и електромагнетна компатибилност електротехничких компоненти и уређаја	10 (десет)	9
7.	Увод у научни рад	10 (десет)	6
8.	Комплексни феномени у физици плазме	10 (десет)	9
9.	Математичко моделовање физичко-техничких процеса	10 (десет)	9
10.	Нумеричка симулација радијационих и нуклеарних реактора	10 (десет)	9

У свом досадашњем раду Иван Кнежевић је објавио следеће радове:

- [1] **Кнежевић И.**, Здјеларевић Н., Обреновић М., Вујисић М.: *Absorbed Dose Assessment in Particle-Beam Irradiated Metal-Oxide and Metal-Nonmetal Memristors*, - Nuclear Technology and Radiation Protection, Vol XXVII, No 3, 2012, pp.290-296

- [2] Гршић З., Павловић С., Орлић М., **Кнежевић И.:** *Модул за процену еквивалентне дозе интерног и екстерног излагања у математичком моделу за распрострањавање радионуклида кроз гранични слој атмосфере у околини нуклеарног објекта*, XXVI Симпозијум Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, Зборник радова, Тара 2011, стр.41-45
- [3] Бајчетић Н., **Кнежевић И.:** *Испитивање стабилности карактеристика гасних одводника пренапона при излагању јонизујућем зрачењу (п и γ)*, 29. Међународно саветовање за велике електроенергетске системе CIGRE, Зборник радова, Златибор 2009, R D1 05
- [4] **Кнежевић И.**, Бајчетић Н.: *Испитивање утицаја температуре на стабилност карактеристика пренапонске диоде*, 29. Међународно саветовање за велике електроенергетске системе CIGRE, Зборник радова, Златибор 2009, R D1 07

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства, сматрамо да је кандидат подобан за израду предложене докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Многе примене меморија подразумевају њихову изложеност јонизујућем зрачењу – приликом коришћења нуклеарне енергије, током процеса управљања и процесирања радиоактивног отпада, приликом стерилизације производа јонизујућим зрачењем, у дозиметрији јонизујућег зрачења, у нуклеарној медицини, радиодијагностици, радиотерапији, приликом коришћења акцелератора у физици високих енергија, у свемирским летелицама. У овим случајевима поузданост и исправан рад меморијских компоненти у великој мери зависе како од карактеристика зрачења, тако и од техничких специфичности разних типова меморија. Због свега наведеног, данас се проучавању радијационе отпорности електронских компоненти посвећује велика пажња.

Идеалне меморије би требало да буду што јефтиније, да имају што боље карактеристике, велику густину, што мању дисипацију снаге, случајан приступ, да буду постојане, да могу лако да се тестирају, да имају високу поузданост и да могу да буду стандардизоване за индустријску примену. Нажалост, такве меморије не постоје и све данашње меморије представљају компромис, којим се тежи што бољем задовољењу наведених услова. Меморијска компонента која би у комбинацији са транзисторима могла да сачињава хибридни чип значајно бољих перформанси од постојећих, јесте резистивна постојана меморијска ћелија.

Предмет истраживања дисертације је утицај јонизујућег зрачења на особине и начин функционисања резистивних постојаних меморија. Основна резистивна постојана меморијска ћелија се састоји од материјала који има резистивна прекидачка својства, смештеност између две металне електроде. До данас, резистивни прекидачки ефекти су откривени и проучавани код разних врста материјала, као што су бинарни оксиди (TiO_2 , SiO_2 , CuO , NiO , CoO , Fe_2O_3 , MoO , VO_2), системи базирани на силицијум диоксиду, системи на металима, оксиди са перовскитном структуром ($\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, $\text{SrTiO}_3\text{:Cr}$), сулфиди (Cu_2S , Ag_2S), полупроводници (Si , GaAs , ZnSe-Ge) и органска једињења. Структура између електрода најчешће подразумева само оксидни материјал (који може имати сегменте са различитим нивоима отпорности), или је у питању сендвич структура, где поред оксидног слоја постоје и слојеви неких од побројаних материјала.

Прекидачки механизми могу бити класификовани на неколико начина. Пре свега, постоје биполарни прекидачки механизми код којих напон различитог поларитета мења отпорно стање материјала: из стања ниске отпорности (reset) у стање високе отпорности (set), или обратно. Код структуре базиране на TiO_2 који се налази између две Pt електроде прекидачке особине се објашњавају променама на електронској баријери на Pt/ TiO_2 интерфејсу које су индуковане дрефтом кисеоничних ваканција под примењеним напонам. Код нанојонски базираних меморија које се састоје од изолатора, као што су оксиди NiO, SiO_2 и SrTiO_3 , смештеност између једне инертне електроде (Pt) и друге електрохемијски активне електроде (Ag или Cu), прекидачки механизам је заснован на кретању јона метала у електролиту према инертној електроди на коју је примењен негативни напон. Хистерезисни механизам у случају перовскитних оксидних филмова $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (PCMO) је заснован на дифузионом моделу кисеоничних ваканција и прекидачком импулсу који је резултат нагомилавања јона кисеоника близу металне електроде мењајући отпорност уређаја. С друге стране, постоје униполарни механизми, код којих сет или ресет стање зависе од амплитуде напона истог поларитета. Механизам је заснован на термалном ефекту и откривен је код метал/оксид/метал структура базираних на Fe_2O_3 и NiO. Поред ефеката базираних на хомогеном кретању носилаца наелектрисања кроз материјал меморијске ћелије, многи резистивни прекидачки ефекти су засновани и на стварању филаментарних структура у материјалу, где само једна или неколико веома уских резистивних путања постоје у ниско резистивном стању. Оба ова ефекта, хомогени и филаментарни, се могу јавити или у целој запремини материјала између две електроде, или у непосредној близини једне од електрода.

Прекидачки механизам уређаја конструисаних од наведених материјала трпи промене због озрачивања, услед ефеката интеракције јонизујућег зрачења са материјалом структуре. Резултати испитивања резистивних прекидачких особина Cu допиране меморијске јединице на бази HfO_2 одмах након озрачивања показују знатне варијације у оперативним вредностима напона и отпорности. Са друге стране, након излагања уређаја на бази TiO_2 гама зрачењу и јонском снопу (Bi), није дошло до деградације уређаја. Ови резултати сугеришу да су резистивне меморије на бази TiO_2 добри кандидати као радијационо чврста електронска компонента за примене у условима изложености зрачењу.

Циљ рада је да се теоријски и нумерички експериментално утврди утицај јонизујућег зрачења на особине и начин функционисања резистивних постојаних меморија. Да би се остварио овај циљ биће развијен модел основне ћелије резистивне постојане меморије. Теоријски изрази ће бити изведени за идеалан физички модел меморијске ћелије, где су претпостављени омско електронско провођење, линеарни јонски дрефт и оштра вертикална разлика између слојева унутар активног дела структуре овог уређаја. На основу познатих вредности флуенса неких типичних радијационих окружења прорачунаће се концентрација дефеката у овим уређајима, на основу чега ће се даље одредити отпорност и промена отпорности активних слојева уређаја, а затим и промене облика струјно-напонске карактеристике.

Најзначајније референце које је кандидат користио у свом истраживању у вези са предметом докторске дисертације су:

- [1] William M.Tong et al.: *Radiation Hardness of TiO_2 Memristive Junctions*, - IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.57, No.3, pp.1640, 2010.
- [2] Strukov D.B. et al.: *The Missing Memristor Found*, - Nature, 453, pp. 80-83, 2008.

- [3] M.Vujisic, K.Stankovic, N.Marjanovic, P.Osmokrovic: *Simulated Effects of Proton and Ion Beam Irradiation on Titanium Dioxide Memristors*, - IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.57, No.4, August 2010.
- [4] N.Marjanovic, M.Vujisic, K.Stankovic, D.Despotovic, P.Osmokrovic: *Simulated Exposure of Titanium Dioxide Memristors to Ion Beams*, - Nuclear Technology & Radiation Protection, vol.25, No.2, pp. 120-125, 2010.
- [5] Bratovski et al.: *Memristive device*, - United States Patent, US 7,985,962 B2, 2011.
- [6] JJ.Yang et al.: *Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices*, - Nat.Nanotechnol., vol. 3, no. 7, pp. 429-433, 2008.
- [7] A.G.Holmes-Siedle and L.Adams: *Handbook of Radiation Effects*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ.Press, pp.17-54, 2002.
- [8] N. Marjanović, M. Vujisić, K. Stanković, P. Osmokrović: *Effects of heavy ion bombardment on TiO₂ memristor operation*, - Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Vol. 166, No. 1, pp. 1-7, 2011.
- [9] Miloš Lj. Vujisić, Dušan S. Matijašević, Edin Ć. Dolićanin, Predrag V. Osmokrović: *Simulated radiation effects in the superinsulating phase of titanium nitride films*, - Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. 26, No. 3, pp. 254-260, 2011.
- [10] J.R.Srour et al.: *Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices*, - IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.50, No.3, pp.661, 2003.
- [11] M. Vujisić, K. Stanković, E. Dolićanin, P. Osmokrović: *Radiation hardness of COTS EPROMs and EEPROMs*, - Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Vol. 165, No. 5, pp. 362 – 369, 2010.
- [12] R.Muenstermann, T.Menke, R.Dittmann, R.Waser: *Coexistence of Filamentary and Homogenous Resistive Switching in Fe-Doped SrTiO₃ Thin-Film Memristive Devices*, - Advanced Engineering Materials, Vol.22, pp. 4819-4822, 2010.
- [13] B.Butcher et al.: *Proton-based total-dose irradiation effects on Cu/HfO₂:Cu/Pt ReRAM devices*, - Nanotechnology, Vol.21, 475206(5pp)
- [14] D.Lee et al.: *Proton Irradiation Effects on Resistive Random Access Memory with ZrO_x/HfO_x Stacks*, - IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.58, No.6, pp.3317-3320, 2011.
- [15] C.Frederick et al.: *Resistance Switching for RRAM applications*, - Science China, Information Sciences, Vol.54, No.5, pp.1073-1086, 2011
- [16] T.Mikolajick et al.: *Nonvolatile Memory Concepts Based on Resistive Switching in Inorganic Materials*, - Advanced Engineering Materials, vol.11, No.4, pp.235-240, 2009.
- [17] R.Waser: *Resistive Non-Volatile Memory Devices*, - Microelectronic Engineering, Vol.89, pp.1925-1928, 2009.
- [18] L.Chua: *Resistance Switching Memories are Memristors*, - Applied Physics A, Vol.102, pp.765-783, 2011

3. Полазне хипотезе

Приликом досадашњих испитивања утицаја зрачења на електронске компоненте, уочено је изразито повећање концентрације дефеката у испитиваним уређајима, промене у нормалном режиму рада, па чак и појава дисфункције компоненти. Приликом испитивања аналогних биполарних интегрисаних кола изложених јонизујућем зрачењу уочени су механизми отказа кола. Код гасних одводника пренапона у присуству зрачења долази до деградације уређаја са установљеним реверзибилним карактером радијационих ефеката, где гасни одводници након престанка зрачења поново попримају карактеристике које су имали пре зрачења. Уочљива је изражена деградација и погоршавање карактеристика соларних ћелија након излагања јонизујућем зрачењу са повећањем апсорбоване дозе. Код меморијског низа базираном на мемристорима, након утицаја зрачења могуће је погрешно читавање. На основу наведених убедљивих показатеља да зрачење производи ефекте у електронским компонентама, па и

меморијским ћелијама, полазна хипотеза базирана је на поређењу теоријских аспеката интеракције јонизујућег зрачења са материјалом, и нумеричких експерименталних резултата након симулације излагања модела резистивне постојане меморијске ћелије радијацији, који показују појаву дефеката у меморијској структури, као и то да је ове дефекте могуће уочити, моделовати, предвидети, ублажити или отклонити.

Површинска и запреминска оштећења посматраних материјала настају расејавањем јонизујућег зрачења на језгрима атома у унутрашњости материјала, или као резултат нуклеарних реакција изазваних упадним зрачењем. Радијациона оштећења у оксидном слоју, као доминантном активном слоју меморијске ћелије, састоје се од три компоненте: појаве наелектрисања заробљеног у оксиду, повећања броја замки на раздвојној површи и пораста броја замки у унутрашњости оксида. Јонизујуће зрачење које пролази кроз оксид може да раскине хемијске везе у структури оксида. Неке од ових веза се могу поново успоставити путем рекомбинације електрона и шупљина, док друге остају раскинуте стварајући електрично активне дефекте. Ти дефекти могу чинити центре захвата носилаца унутар оксида или површинске замке за носиоце.

Еластична расејања на језгрима доводе до избацивања атома из њихових положаја у кристалној решетки, што доводи до оштећења измештањем. Кинетичка енергија примарно избаченог атома може бити довољно велика да изазове измештање читавог низа других језгара, која и сама могу да измештају друга језгра, чиме се ствара каскада измештених атома. Полазећи од примарно избаченог атома, нови измештени атоми се појављују разгранато кроз материјал, формирајући стабло измештања. Нејонизујуће интеракције измештања доминирају при крају путање узмаклог атома. Тако се на крајевима грана стабла измештања образују завршни кластери са високом концентрацијом дефеката. Дефекти који настају дуж путања измештених атома, као и кластери дефеката на крајевима ових путања чине основ радијационих оштећења.

Додатна хипотеза је да се, на основу изложених чињеница о радијационим ефектима, моделира утицај зрачења на конкретан тип резистивне постојане меморије и упореде различити материјали са отпорним свичовањем са аспекта радијационе отпорности.

4. Научне методе истраживања

У сврху потврде теоријских исказа и поређења са експерименталним резултатима других аутора приликом озрачавања резистивних меморијских компоненти, у моделу меморијске ћелије ће се варирати теоријски претпостављени погодни материјали за конституисање који до сада нису били предмет истраживања, и биће вршене симулације где ће меморијске ћелије бити излагане неким од добро познатих радијационих поља, као што су поља која се јављају у свемиру или поља која се јављају у околини нуклеарног објекта. Симулације ће подразумевати моноенергетске снопове зрачења, који ће бити нормални на бочне стране уређаја. Енергија снопа ће бити мењана за читав типичан енергетски спектар различитих врста зрачења. За сваку врсту јона и његову енергију, симулација транспорта честица вршиће се два пута, са сноповима усмереним према супротним странама слојне структуре ћелије. Експериментално ће бити одређене путање честица и јона кроз материјал уређаја и дистрибуције измештених атома градивних молекула материјала и насталих дефеката у уређају. Биће развијен MatLab код за прорачун апсорбоване дозе у структури за све комбинације конститутивних материјала уређаја, и типове и енергије радијационих поља на основу излазних параметара Монте Карло симулације. Разматраће се како се радијациони ефекти у посматраним меморијама манифестују у зависности од архитектуре меморија.

5. Очекивани научни допринос

Израда предложене дисертације требало би да допринесе развоју математичких модела за конструисање резистивних постојаних меморија и начина процене утицаја радијационог поља на ове структуре. Развој модела је од посебног значаја јер омогућава предвиђање понашања меморија у срединама где постоји велика изложеност јонизујућем зрачењу, а где човек због објективних услова не може боравити.

На основу исцрпне анализе физичких процеса који се одвијају приликом проласка јонизујућег зрачења кроз материјал резистивних постојаних меморија кроз преглед литературе и нумеричко и теоријско истраживање очекују се следећи резултати:

- Свеобухватан и шематизован преглед процеса интеракције зрачења са материјалом резистивних постојаних меморија,
- Дефинисање модела резистивне постојане меморијске јединице у циљу што адекватније симулације реалних физичких процеса,
- Приказ дистрибуције измештених атома и насталих дефеката у испитиваним материјалима након излагања радијационом пољу,
- Израчунавање апсорбоване дозе у материјалу уређаја у зависности од врсте, енергије и флукса упадног зрачења,
- Утврђивање могућности и начина радијационог очвршћавања резистивних постојаних меморија.

6. План истраживања и структура рада

У уводном делу рад ће садржати осврт на досадашњу инострану праксу, опис проблема, реализована достигнућа и резултате приликом испитивања начина функционисања резистивних постојаних меморија и њиховог понашања у радијационом пољу. Указаће се на циљеве истраживања и значај потребе да се одреде могућности радијационог очвршћавања резистивних постојаних меморија. У другом поглављу ће бити представљене карактеристике радијационог поља у космосу, земљиној атмосфери, у околини нуклеарних објеката, као и у физици високих енергија - као срединама у којима је могућа апликација меморија. Са тим у вези ће бити разматрани ефекти јонизујућег зрачења приликом проласка кроз материјал. Интеракција зрачења са материјалом је разматрана на нивоу изолованог атома тог материјала, независно од агрегатног стања и типа хемијских веза међу атомима. Представљено је расејање на електронима у омотачу, нееластична и еластична расејања на језгру, као и механизми радијационих оштећења у полупроводницима и изолаторима. У трећем поглављу ће бити изложене опште карактеристике резистивних постојаних меморија, и извршено њихово поређење са другим типовима меморија које су у актуелној употреби данас. Објасниће се структура основне меморијске јединице, принцип поделе меморија према томе у ком се од два отпорна оперативна стања налазе (set и reset), и принцип рада резистивних постојаних меморија базираних на електродама, на термохемијском механизму и на дефектима. Четврто поглавље се односи на радијациона оштећења у резистивним постојаним меморијама. У петом поглављу ће бити престављен експериментални део рада који обухвата испитивање радијационе отпорности модела основне меморијске јединице, на основу чега ће бити представљена дистрибуција насталих дефеката у материјалу мете и израчуната апсорбована доза у сваком од слојева испитиваног материјала. На основу описаних теоријских и експерименталних разматрања одзива резистивних постојаних меморија након излагања зрачењу, у закључку рада ће бити речи о радијационој

компатибилности датих меморија са становишта врсте зрачења, типа материјала, као и о могућим начинима радијационог очвршћавања.

7. Закључак и предлог

На основу свега приложеног, Комисија сматра да кандидат Иван Кнежевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. Резултати до којих би кандидат требало да дође, имали би значајан допринос у области физичке електронике. Стога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Ивану Кнежевићу одобри израду докторске дисертације под насловом "Радијациона отпорност резистивних постојаних меморија", под руководством ментора доц. др Милоша Вујисића.

У Београду, 30.1.2013.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Милош Вујисић, доцент (ментор)
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Предраг Осмокровић, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Александра Васић-Миловановић, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду