

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Подобност теме и кандидата Невене Здјеларевић за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5043/08-1 од 16.04.2013. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Невене Здјеларевић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме "Ефекти јонизујућег зрачења у фазно променљивим меморијама".  
На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. Подаци о кандидату

##### 1.1. Биографски подаци

Невена Здјеларевић рођена је 26.9.1984. године у Београду. Основну школу завршила је у Београду са Вуковом дипломом и звањем ђака генерације. Математичку гимназију у Београду завршила је са одличним успехом и 2003. године уписала Електротехнички факултет у Београду. Основне студије на одсеку за Физичку електронику, смер Биомедицински и еколошки инжењеринг, завршила је 2007. године, са општим успехом 9,70 у току студија и оценом 10 на дипломском испиту. Дипломски рад под називом "Заштита од зрачења код примене  $\text{Ir}^{192}$  у индустријској радиографији" одбранила је код професора Предрага Осмокровића. Мастер студије на одсеку за Физичку електронику, смер Биомедицински и еколошки инжењеринг, завршила је 2008. године, са просечном оценом 10,00. Мастер рад под називом "Одређивање ефикасних пресека за интеракцију радиотерапијског гама зрачења са ткивом " одбранила је под менторством проф. Предрага Осмокровића, са оценом 10. Докторске студије на студијском подручју Нуклеарна, медицинска и еколошка техника уписала је школске 2008/2009, положила је све испите са просечном оценом 10,00 и одрадила све обавезе предвиђене наставим програмом докторских студија за прве две године.

Од септембра 2008. запослена је као инжењер за заштиту од зрачења у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине Института за нуклеарне науке "Винча", где је радила на пословима оперативне радијационе сигурности на пројекту "VIND". 2009. године похађа и успешно завршава 182. специјални курс заштите од јонизујућих зрачења под називом "Мере радијационе и нуклеарне сигурности у Институту Винча". Током 2009-2010. године завршава низ обука: мерење садржаја гама-активних радионуклида у целом телу човека, алфа-бета спектрометријско мерење на тачном сцинтилационом спектрометру и анализа резултата, коришћење преносних монитора зрачења са сондама и електронских

личних дозиметара, гамаспектрометријска мерења, итд. На регионалном скупу 2009. године у организацији Међународне агенције за атомску енергију под називом " Regional Workshop on Safety of Radioactive Waste Management " у Немачкој, представља земљу као експерт заштите од зрачења и држи националну презентацију у вези са радијационом сигурношћу. Од 1.10.2009. је запослена у Јавном предузећу "Нуклеарни објекти Србије" као инжењер за оперативну радијациону сигурност. У јулу 2010. завршава обуку на "Националном курсу о сигурном и безбедном отпремању истрошеног нуклеарног горива из Републике Србије у Руску Федерацију". Током препакивања и транспорта нуклеарног горива из Републике Србије у Руску Федерацију ради као руководиоца сменског особља. Након завршетка пројекта "VIND", испитује и врши мерења алфа и бета активности у биолошким узорцима и узорцима воде и врши мерења екстерног излагања професионално изложених лица у Јавном предузећу "Нуклеарни објекти Србије".

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Невена Здјеларевић је током докторских академских студија положила 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 Невена Здјеларевић је објавила 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] Бајчетић Н., Кнежевић И.: *Испитивање стабилности карактеристика гасних одводника пренапона при излагању јонизујућем зрачењу ( $\alpha$  и  $\gamma$ )*, 29. Међународно саветовање за велике електроенергетске системе CIGRE, Зборник радова, Златибор 2009, R D1 05

[3] 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**

Развој друштва зависи од његове способности да приступи, сачува и обезбеди информације, где год и кад год је то потребно. Последњих неколико деценија, видови размене и складиштења информација доживели су значајан низ промена. У том смислу, меморије су виталан део сваког електронског уређаја. Како процесори бивају бржи, меморије постају уско грло у ланцу преноса информација. Да би се овај проблем решио, савремена индустрија може или унапредити постојеће меморијске технологије или истражити и патентирати нове. Међу најактуелнијим новим технологијама данас јесу фазно променљиве меморије, које превазилазе неке од недостатака флеш меморија, као што су век трајања и степен минијатуризације.

Повећање капацитета и трајности, смањење димензија и постојаност доводе до све масовније употребе фазно променљивих меморија у различитим радним условима и срединама. Многе примене меморија подразумевају њихов боравак у пољу јонизујућег зрачења: у нуклеарној медицини, у нуклеарним електранама, у дозиметрији јонизујућег зрачења, код вештачких сателита, свемирских и војних летелица. У таквој средини, једна једина наелектрисана честица може јонизацијом да произведе на хиљаде електрона у средини кроз коју пролази, повећавајући шум и доводећи до деформације сигнала. У општем случају, код дигиталних кола ово може довести до нетачног читавања резултата и чувања погрешних информација. Истраживања су показала да се и код халкогених материјала дебљине пар десетина нанометара, који чине основ фазно променљивих меморија, јављају површинска и запреминска оштећења услед интеракције јонизујућег зрачења са активним материјалом компоненте. С обзиром да ове меморије, због добрих перформанси, могу наћи место у свим наведеним применама, важно је да се испита степен њихове радијационе отпорности и упореди стабилност карактеристика у условима изложености зрачењу са радом у нормалним условима.

**Предмет истраживања** јесте утицај јонизујућег зрачења на постојаност фазно променљивих меморија. Фазно променљива меморија представља класу постојаних меморија која користи јединствене особине фазно променљивих материјала за чување података. Основна ћелија ових меморија састоји се од слоја фазно променљивог материја, који се налази између две металне електроде изоловане одговарајућим изолаторским филмом. Фазно променљиви материјали (ФП материјали) представљају халкогене легуре: материјале који садрже један или више елемената из VI групе периодног система. Најчешће коришћени ФП материјали су:  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ,  $\text{Si}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ,  $\text{AgInSbTe}$  и  $\text{AgSbSe}_2$ . Они имају два стабилна чврста стања (две фазе): аморфно и поликристално. У аморфном стању ови материјали имају велику отпорност, док у поликристалном имају пар редова величина мању отпорност. Фазно променљиве меморије користе ову велику разлику у отпорности фаза материјала за чување информација. За наведене материјале карактеристично је да могу брзо да прелазе из једног стања у друго. Одговарајућим загревањем, односно хлађењем материјала мења се његово фазно стање (из

аморфног у поликристално стање или обрнуто), а самим тим и отпорност. У фазно променљивој меморијској ћелији на коју је примењен растући напон, промена фазе због Џулових губитака дешава се у виду празног прекидања (енг. *threshold switching*), које представља нагли пораст отпорности када се пређе критична вредност електричног поља. Ако се у ћелији у аморфном стању поље одржава нижим од овог прага, отпорност се повећава са временом. Овај ефекат се назива отклон отпорности (енг. *resistance drift*). Како би се најбоље разумела могућа радијациона оштећења фазно променљиве меморије, поред основних карактеристика структуре и материјала који је изложен зрачењу, потребно је посебну пажњу посветити механизмима интеракције различитих врста зрачења са материјалима. Радијациони ефекти у фазно променљивим меморијама укључују измештање атома, образовање дефеката, јонизацију и фононске побуде (које доводе до загревања). Упадни јон постепено губи енергију и на крају своје путање захвата електроне како би постао електро-неутралан (нпр. протон ће постати водоник, алфа честица хелијум). У два наведена примера, неутрални атом (водоник или хелијум) је на собној температури гас, који унутар посматраног материјала врши притисак на суседне атоме. Електрони и фотони не могу директно произвести дефекте у материјалу, као јони и неутрони, али могу посредно, раскидањем хемијских веза у молекулима. Измештање атома настаје услед еластичног расејања упадне наелектрисане честице са језгром атома. Уколико је атому предата кинетичка енергија која је већа од енергије прага за измештање, долази до избацивања тог атома из његовог првобитног положаја. Примарни измештени атоми могу довести до даљих измештања атома или јонизације. Оштећења измештањем су резултат кумулативних нејонизујућих оштећења насталих услед проласка зрачења кроз материјал и могу се квантификовати помоћу величине која се назива доза измештања (енг. *displacement damage dose*).

**Циљ рада** је развијање оригиналних модела који описују утицај зрачења на карактеристике и рад фазно променљивих меморија и омогућавају предвиђање понашања ових меморија у радијационим срединама, као и избор одговарајућих материјала и техничких поступака који би ове меморије учинили радијационо чвршћим. Такође, биће успостављена веза између апсорбоване дозе, односно дозе измештања и фононских губитака, и радијационих оштећења у фазно променљивим меморијама. На основу спроведене анализе зависности радијационих оштећења од дебљине фазно променљивог материјала и енергије упадног зрачења биће установљени критеријуми за избор најпогоднијег материјала за фазно променљиве меморије, са аспекта радијационе чврстоће.

Најзначајније референце које ће кандидат да користи у свом истраживању у вези са предметом докторске дисертације су:

- [1] Ovshinsky, S., *Reversible electrical switching phenomena in disordered structures*, Physical Rev. Lett, Vol 21, No 20, 1968, pp.1450-1453.
- [2] Wuttig, M., Yamada, N., *Phase-change materials for rewritable data storage*, Nature Materials, Vol 6, No 12, 2007, pp.824-832.
- [3] Welnic, W., Wuttig, M., *Reversible switching in phase-change materials*, Materials Today, Vol 11, No 6, 2008, pp.20-27.
- [4] Wong, P., et al., *Phase Change Memory*, Proceedings of the IEEE, Vol 98, No 2, 2012, pp.2201-2227.
- [5] Senkader, S., et al., *Models for phase change of in optical and electrical memory devices*, Japanesse Applied Physics, Vol 95, No 2, 2004, pp.504-511.

- [6] Ferreira, A. P., et al., *Using PCM in Next-generation Embedded Space Applications*, -16th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 16th IEEE, 2012, pp. 153-162.
- [7] Barth, J. L., et al., *Space, Atmospheric, and Terrestrial Radiation Environments*, IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol 50, No 3, 2003, pp.466-482.
- [8] Tsoulfanidis, N., *Energy Loss and Penetration of Radiation through Matter*, chapter 4 in *Mesurement and Detection of Radiation*, Second Edition, 1995, pp.121-149.
- [9] Holmes-Siedle, A.G., Adams, L., *Handbook of Radiation Effects*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2002, pp.17-54.
- [10] Was, G. S., *Phase Stability Under Irradiation*, chapter 9.7 in *Fundamentals of Radiation Materials Science*, 2007, pp.463-490.
- [11] Maimon, J., et al., *Chalcogenide Memory Arrays: Characterization and Radiation Effects*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 50, No 6, 2003, pp. 1878-1884.
- [12] Srour, J.R., et al., *Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 50, No 3, 2003, pp.653-670.
- [13] Gerardin, S., et al., *Single Event Effects in 90 nm Phase Change Memories*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 58, No 6, 2011, pp.2755-2760.
- [14] Gasperin, A., et al., *Analysis of Proton and Heavy-Ion Irradiation Effect on Phase Change Memories With MOSFET and BJT Selectors*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 55, No 6, 2008, pp.3189-3196.
- [15] Almeida, P., et al., *Atomic displacement in solids: analysis of the primary event and the collision cascade*, European Journal of Physics, Vol 26, No 3, 2005, pp. 371-389.
- [16] Messenger, S.R., et al., *Nonionizing Energy Loss (NIEL) for Heavy Ions*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 46, No 6, 1999, pp.1595-1602.
- [17] Messenger, S.R., et al., *Proton Nonionizing Energy Loss (NIEL) for Device Applications*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 50, No 6, 2003, pp.1924-1928.
- [18] Jun, I., et al., *Alpha Particle Nonionizing Energy Loss (NIEL)*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 51, No 6, 2004, pp.3207-3210.
- [19] Xapsos, M.A., et al., *NIEL Calculations for High-Energy Heavy Ions*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 51, No 6, 2004, pp.3250-3254.
- [20] Ielmini, D., et al., *Phase change materials in non-volatile storage*, Materials Today, Vol 14, No 12, 2011, pp.600-607.
- [21] Ielmini, D., et al., *Analytical model for subthreshold conduction and threshold switching in chalcogenide-based memory devices*, Journal of Applied Physics, Vol 102, No 5, 2007, pp.824-832.
- [22] Pirovano, A., et al., *Electronic switching in phase-change memories*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 51, No 3, 2004, pp.452-459.
- [23] Raoux, S., Wuttig, M., *Phase Change Materials*, Springer Science, USA, 2009.
- [24] SangBum, K., *Scalability and Reliability of Phase Change Memory*, PhD dissertation of Departement of Electrical Engineering, Stanford University, USA, 2012, pp. 12-16.
- [25] Qu, L.W., et al., *SET/RESET properties dependence of phase-change memory cell on thickness of phase-change layer*, Solid-State Electronics Vol 56, No.1, 2011, pp.191-195.

### 3. Полазне хипотезе

Пролазак јонизујућег зрачења кроз структуру фазно променљивих меморија изазива одређене промене карактеристика у фазно променљивом материјалу, као и у целој меморијској структури. Ове промене могу утицати на понашање фазно променљиве меморије. Ефекте које изазива јонизујуће зрачење приликом проласка кроз фазно променљиву меморију могуће

је описати теоријским моделима. Развијени модели пружиће могућност да се процени утицај зрачења на регуларност рада и перформансе фазно променљиве меморије.

#### **4. Научне методе истраживања**

Први део истраживања обухватаће проучавање функционисања фазно променљивих меморија. Затим ће бити анализирани постојећи модели за електронски транспорт, прекидачки механизам и отклон отпорности у фазно променљивим меморијама. Већина модела који описују електронски транспорт у фазно променљивим материјалима је заснована на појави локализованих замки унутар забрањене зоне. Како би се испитао утицај јонизујућег зрачења на промену концентрације ових локализованих замки, као и на остале перформансе фазно променљивих меморија, биће коришћена Монте Карло симулација за транспорт јонизујућег зрачења кроз материјал. Монте Карло симулација ће подразумевати моноенергетске усмерене снопове зрачења, који падају нормално на бочне стране меморијске структуре. Енергија упадног снопа ће бити варирана кроз типичан енергетски опсег за сваку испитану врсту зрачења, који се среће у свемиру или у околини нуклеарног објекта. Прорачуни апсорбоване дозе у фазно променљивој меморијској ћелији и засебно у фазно промењивом слоју, за све типове и енергије упадног зрачења, биће изведени помоћу оригинално развијеног кода у MATLAB програмском пакету. Такође, биће развијени и MATLAB кодови који ће бити коришћени за прорачун дозе измештања, као и фононских губитака у фазно променљивој меморији. На основу добијених вредности, прорачунаће се концентрација дефеката у овим меморијама након излагања јонизујућем зрачењу, на основу чега ће бити успостављен модел за описивање утицаја зрачења на фазно променљиве меморије. На крају истраживања, разматраће се како се радијациони ефекти у фазно променљивој меморијама манифестују у зависности од архитектуре меморија.

#### **5. Очекивани научни допринос**

На основу исцрпне анализе физичких процеса који се одвијају приликом проласка јонизујућег зрачења кроз структуру фазно променљивих меморија, добијене експерименталним и теоријским истраживањима очекују се следећи резултати:

- 1) Дефинисање модела фазно променљивих меморија у циљу што адекватније симулације реалних физичких процеса
- 2) Прорачуни апсорбоване дозе, дозе измештања и фононских губитака у фазно променљивом слоју, као и у целој фазно променљивој ћелији, у зависности од врсте, енергије и флуенса упадног зрачења, за различите конструкције меморијске ћелије, добијени на основу симулације транспорта зрачења кроз испитивану структуру
- 3) Развијање теоријског физичког модела који описује ефекте зрачења на постојаност фазно променљивих меморија
- 4) Идентификовање параметара фазно променљиве меморије критично сензитивних на утицај зрачења, помоћу претходно развијених модела
- 5) Поређење актуелних типова фазно променљивих меморија са становишта осетљивости на озрачивање, у зависности од специфичног дизајна меморије
- 6) Утврђивање могућности и начина радијационог очвршћавања фазно променљивих меморија

## 6. План истраживања и структура рада

План истраживања предложеног рада садржи следеће активности:

- Детаљна анализа физичких и електричних карактеристика структура које сачињавају фазно променљиву ћелију и архитектуре овог типа меморије
- Детаљна анализа специфичности интеракције различитих типова зрачења са фазно променљивим меморијама, на нивоу меморијских блокова, појединачних ћелија и структура унутар ћелија
- Спровођење нумеричких експеримената, који за циљ имају да се установи које врсте зрачења значајније утичу на особине и рад ових меморија, као и на који начин се параметри меморије мењају под дејством зрачења
- Нумерички експерименти ће бити спроведени за актуелне типове фазно променљиве ћелије и флуенсе упадног зрачења који се срећу у савременој радијационој пракси
- Моделовање ефеката зрачења на постојаност фазно променљиве меморије у зависности од типа и енергије зрачења
- Анализа могућих начина радијационог очвршћавања фазно променљиве меморије.

### Планирана структура рада

- Поглавље 1: општи увод
- Поглавље 2: преглед основних радијационих средина у којима се користе меморијске компоненте, укључујући космос, земљину атмосферу, нуклеарну медицину, нуклеарне електране. Посебна пажња биће посвећена радијационим срединама у којима се могу наћи свемирске или војне летелице, услед великог интересовања иностраних компанија за примену фазно променљивих меморија у ове сврхе. Приказ основних механизма интеракције јонизујућег зрачења са полупроводним материјалом у чврстом стању, у зависности од врсте зрачења (директно или индиректно јонизујуће зрачење).
- Поглавље 3: особине и начин функционисања фазно променљивих меморија, попречни пресеци типичних структура фазно променљиве меморијске ћелије, приказ меморијског низа и одговарајућих периферних кола. Основне особине фазно променљивих материјала, њихова структура у аморфном и кристалном стању и физика фазних прелаза.
- Поглавље 4: модели електронског транспорта у фазно променљивим материјалима.
- Поглавље 5: приказ механизма и ефеката радијационих оштећења у фазно променљивим меморијама.
- Поглавље 6: излагање резултата нумеричких експеримената који ће бити пропраћени графицима симулираних трагова зрачења у посматраним структурама након излагања јонизујућем зрачењу одговарајућег типа и енергије, као и табеларно и графички приказане зависности јонизујућих и нејонизујућих енергетских губитака, апсорбоване дозе, дозе измештања и фононских губитака у испитиваном материјалу од специфичног дизајна меморије као и од енергије упадног зрачења.
- Поглавље 7: моделирање радијационих оштећења у фазно променљивим меморијама.
- Поглавље 8: закључак. Говориће се о радијационој постојаности фазно променљивих меморија са становишта врсте материјала, структуре меморијске ћелије, као и типа зрачења, и биће размотрен начин радијационог очвршћавања фазно променљиве меморије.

## 7. Закључак и предлог

На основу приложеног, Комисија сматра да кандидат Невена Здјеларевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. Резултати до којих би кандидат требало да дође, били би значајан допринос области физичке електронике. Стога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Невени Здјеларевић одобри израду докторске дисертације под насловом "Ефекти јонизујућег зрачења у фазно променљивим меморијама", из области физичке електронике, под руководством ментора доц. др Милоша Вујисића.

У Београду, 31.5.2013.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

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

---

др Предраг Осмокровић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

---

др Бранислав Вулевић, научни сарадник  
Јавно предузеће "Нуклеарни објекти Србије"