

## НАСТАВНО–НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **мр Србољуба Станковића**

Одлуком Наставно–научног већа бр. 824/3 од 28.4.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Србољуба Станковића, дипл. ел. инж. под насловом

### **Експериментална карактеризација и Монте Карло симулација дозиметријских параметара МОСФЕТ структуре у пољима јонизујућег зрачења.**

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

Мр Србољуб Станковић је завршио магистарске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер Нуклеарна техника и примењена нуклеарна физика, 1999. године. Магистарску тезу под називом „Побољшање неутрон-гама дискриминације мерењем варијансе струје јонизационе коморе“ одбранио је дана 21.5.1999. године, а ментор је био проф. др Влада Теодосић.

Тему докторске дисертације „Експериментална карактеризација и Монте Карло симулација дозиметријских параметара МОСФЕТ структуре у пољима јонизујућег зрачења” пријавио је 26.3.2015. године на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет.

Дана 31.3.2015. године Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно–научном Електротехничког факултета већу на усвајање. Наставно–научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр 824/1 од 29.4.2015.). На дан 23.6.2015. Наставно–научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 824/2). Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-3015/2-15 од 6.7.2015. године).

Дана 7.4.2016. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену. На дан 12.4.2016. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно–научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно–научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације

(број одлуке 824/3 од 28.4.2016. године) у следећем саставу: др Предраг Маринковић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду; др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду; др Бранко Матовић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча“; др Вујо Дрндаревић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду; др Милош Вујисић, доцент, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

## 1.2. Научна област дисертације

Ова дисертација припада научној области техничких наука – електротехника и рачунарство, ужим научним областима нуклеарна техника и физичка електроника.

Именована су двојица ментора, др Предраг Маринковић, редовни професор Електротехничког факултета и др Милан Тадић, редовни професор Електротехничког факултета.

Др Предраг Маринковић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, при Катедри за микроелектронику и техничку физику, аутор је или коаутор више радова са *SCI* листе, као и саопштења са домаћих и међународних конференција, а из уже научне области нуклеарна техника.

Др Милан Тадић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, при Катедри за микроелектронику и техничку физику, активно се бави истраживањем из области наноструктура и наноелектронике. До сада је публиковао 50 радова са импакт фактором (часописи са *JCR* листе) који су цитирани више од 400 пута.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Србољуб Станковић је рођен 26. фебруара 1965. године у Београду. Основну и средњу школу је завршио у Ћуприји. На Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на одсеку Техничка физика, дипломирао је 1990. године на теми: „Примена теорије транспорта електромагнетног зрачења на систем велике концентрације случајно распрострањених честица“, остваривши средњу оцену 8,77. На истом факултету је стекао и титулу магистра електротехничких наука-област нуклеарне технике, 1999. године, одбранивши магистарски рад под насловом „Побољшање неутрон-гама дискриминације мерењем варијансе струје јонизационе коморе“.

Од 1991. године запослен је у звању истраживача у Институту за нуклеарне науке „ВИНЧА“-Лабораторија „Заштита од зрачења и заштита животне средине“. На стручним пословима дозиметрије и заштите од зрачења, као и и метрологије величина јонизујућег зрачења ангажован је у периоду од 1991. до данас, у Метролошкој Дозиметријској лабораторији (МДЛ) која је у светском ланцу Секундарних Стандардних Дозиметријских Лабораторија (ССДЛ). Ова лабораторија је од 2010. године акредитована лабораторија за еталонирање у оквиру Лабораторије за Радијациона Мерења (ЛРМ) - Лабораторија „Заштита“.

Изабран је у звање истраживач сарадник 1999.године. Од 2001. – 2003. године био је ангажован на Електротехничком факултету у Београду на извођењу лабораторијских вежби из предмета „Физика материјала“ и „Електротехнички материјали“. Реизабран је у звање истраживач сарадник 2005. године. Поред тога што је радио као дозиметриста у заштити од зрачења и као метролог у области еталонирања из домена величина јонизујућег зрачења, налази се у тиму колега из МДЛ са задатком да учествује у одржавању и погону експерименталних уређаја за стварање поља гама зрачења ИРПИК А, ИРПИК Б и ИРПИК Ц, као и дозиметријског рентген уређаја Philips MG-320. Такође, у периоду 1991 - 2003. године био је распоређен у МДЛ и на пословима одржавања уређаја за стварање референтног поља неутронског зрачења са извором калифорнијума (Cf-252) и неутронске дозиметрије.

У периоду 2002 – 2007. године учествовао је на извођачком пројекту „Санација земљишта и објеката погођених радиоактивном муницијом од осиромашеног уранијума на Југу Србије“. Притом је био и оперативни руководилац на терену при спровођењу стручног ангажовања комбиноване екипе стручњака из ИНН „ВИНЧА“ и АБХО Војске Србије на локацијама „Боровац 1 и 2“ и „Рељан“ у периоду 2005 - 2007.године. Учествовао је као дозиметриста у послу уклањања радијума из бункера Онколошког Института Србије у Београду, 2008. године, као и на сличним пословима деконтаминације и дозиметрије на другим локацијама на територији Србије. у протеклом периоду.

Од јануара 2011. године до 2015. године, поред послова истраживача, метролога и дозиметристе у пољима јонизујућег зрачења, био је ангажован и по посебном радном задатку на одржавању радних услова за поседовање акредитације за обављање послова у области мерења нивоа нејонизујућег електромагнетског зрачења.

У мају 2014. године стекао је звање стручног саветника на основу одлуке Научног већа Института за нуклеарне науке „Винча“.

У свом досадашњем научноистраживачком раду био је истраживач на следећим пројектима: од 1991-2000.г. на пројекту „Научне основе заштите животне средине, радијациони и физичко-хемијски аспекти“, од 2001-2005.г. на пројектима „Физика танких полупроводничких слојева за нуклеарне детекторе и фотонапонске ћелије“ и „Физика заштите од зрачења“, од 2006-2010.г. на пројектима „Заштита од зрачења – фундаментални теоријски и експериментални физички аспекти“ и „Физика електромагнетне и радијационе компатибилности електротехничких материјала и компонената“. У периоду од 2011-2016.г. ангажован је као истраживач А3 категорије на пројектима „Нове технологије за мониторинг и заштиту животног окружења од штетних супстанци и радијационог оптерећења“ и „Физички и функционални ефекти интеракције зрачења са електротехничким и биолошким системима“. Био је члан истраживачке екипе на међународном пројекту 2006: FP6-2005-INCO-WBC/SSA-3: The Reinforcing Research Potential in Environmental Monitoring and Data Management in Serbia - EMON project.

У раду на научно-истраживачким пројектима Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије. у периоду од 1996. године до данас, кандидат је као аутор или коаутор учествовао у публикавању 30 радова у међународним часописима са *SCI* листе, од којих су 3 рада категорије M21, 10 радова су категорије M22, 15 радова су категорије M23 и 2 рада категорије M24. Од тога, у периоду од 2006. до данас био је први аутор на 10 радова у међународним часописима са *SCI* листе у којима је предмет истраживања у ужем или ширем смислу повезан са избором и дефинисањем теме докторске дисертације.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација има укупно 113 страна и садржи 61 слику, 42 једначине, 25 табела и 60 библиографских референци. Састоји се од насловне стране (на српском и енглеском језику), захвалнице, кратког резимеа (на српском и енглеском језику), садржаја и текста дисертације подељеног на 7 поглавља, два прилога и биографије аутора. Дисертација је уобличена по следећим поглављима:

1. Увод,
2. Ефекти интеракције јонизујућег зрачења са МОС транзистором,
3. Експерименти,
4. Експериментални резултати и дискусија,
5. Нумерички експерименти и дискусија,
6. Закључак,
7. Литература.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводу је дато образложење важности тематике којој је посвећена дисертација, приказана је мотивација за обављена истраживања, дефинисани су основни појмови за експерименталну карактеризацију и Монте Карло симулацију дозиметријских параметара МОСФЕТ структуре у пољима јонизујућег зрачења. Потом су истакнути циљ рада и укратко његов значај, као и полазне хипотезе. Циљ овог рада је примена специфичне методологије којом се прецизније прати утицај јонизујућег зрачења на карактеристике МОСФЕТ компоненте. Специфичност методологије се огледа у томе да поред тога што се одређује зависност промене напона прага од експериментално одређене апсорбоване дозе у МОСФЕТ-у који се налази у пољу јонизујућег зрачења, уводе се и Монте Карло прорачуни величина од којих зависе дозиметријски параметри МОСФЕТ структуре и сагледава се њихова веза са резултатима експеримента. Основне хипотезе за истраживачки рад су биле: 1. могуће је успоставити зависност између промене напона прага МОСФЕТ компоненте као идентификованог дозиметријског параметра и апсорбоване дозе зрачења у пољу јонизујућег зрачења; 2. коришћењем метода Монте Карло за нумеричке симулације транспорта фотона и електрона као честица јонизујућег зрачења могуће је одредити вредност апсорбоване дозе у дозиметријски осетљивој запремини структуре МОСФЕТ-а. На крају увода је дат кратак преглед садржаја појединачних поглавља.

У другом поглављу су разматрани ефекти интеракције јонизујућег зрачења са МОС транзистором. Истакнуто је да су од посебног значаја ефекти јонизације у силицијуму (Si) као полупроводнику и силицијум диоксиду ( $\text{SiO}_2$ ) који се манифестују преко неколико процеса: генерисање парова електрон-шупљина на путањи секундарних електрона насталих као последица интеракција између фотона и материјала; брза рекомбинација већина парова електрон-шупљина; транспорт слободних носилаца наелектрисања у оксиду; захват наелектрисања, односно формирање позитивних просторних наелектрисања уз појаву рекомбинационих центара и електричног поља; формирање наелектрисања на спојевима Si-SiO<sub>2</sub> посредством реакција јона водоника. Поред теоријских аспеката који се односе на механизме захваћеног наелектрисања у SiO<sub>2</sub>, значајна пажња је посвећена моделима којима се описује захват наелектрисања на међуповрши Si-SiO<sub>2</sub>. На крају уводног дела дат је преглед утицаја јонизујућег зрачења на електричне карактеристике МОС транзистора.

У трећем поглављу су описани експериментални услови за озрачивање МОСФЕТ компоненти, мерни системи за „статички“ и „динамички“ он-лине режим мерења промене напона прага МОСФЕТ-а у пољима јонизујућег зрачења и основне карактеристике МОСФЕТ компоненти пре озрачивања. Експериментални услови за озрачивање МОСФЕТ компоненти су били остварени у радијационом пољу гама зрачења кобалта Co-60 и високоенергетског X и електронског зрачења линеарног акцелератора. У експериментима је коришћен чип ESAPMOS4 RADFET као сложенија интегрисана компонента која садржи 4 појединачна RADFET-а. Сваки од њих има посебну ознаку типа и техничко-технолошке карактеристике у ширини и дужини канала између дрејна и сорса, као и у броју приступних терминала.

Четврто поглавље је посвећено презентацији резултата мерења која се односе на експерименталну карактеризацију дозиметријских параметара МОСФЕТ компоненти, са пратећом дискусијом. Посебно су издвојени резултати енергетске зависности нормализованог одзива МОС транзистора у пољима јонизујућег зрачења.

У петом поглављу су приказане теоријске основе и дат је преглед резултата примене методе Монте Карло за прорачун депоноване енергије у материјалним зонама МОС транзистора и других детектора зрачења приликом транспорта фотона и електрона као честица јонизујућег зрачења. Један од истраживачких фокуса у дисертацији је демонстрација методологије која је заснована на Монте Карло прорачунима за одређивање вредности

фактора физичке заштите МОС транзистора коришћењем софтверског пакета FOTELP-2K10. У оквиру петог поглавља приказан је један начин како може да се успостави релација између прорачунате вредности апсорбоване дозе по инцидентној честици у оксиду гејта са експериментално одређеним вредностима промене напона прага од укупне апсорбоване дозе зрачења.

У шестом поглављу изложен је закључак и сумирана су научна истраживања обављена приликом рада на дисертацији. Приказани су најважнији доприноси проистекли из овог рада и наведене су смернице за будућа истраживања.

У седмом делу дат је списак коришћене литературе.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Тема и садржај ове докторске дисертације су савремени због: 1. примењене експерименталне карактеризације дозиметријских параметара МОСФЕТ компоненти; 2. коришћења методе Монте Карло у симулацији интеракције јонизујућег зрачења са МОСФЕТ структуром; 3. примене добијених резултата за унапређење карактеристика МОСФЕТ дозиметара и развоја полупроводничких направа различитог типа које би могле да се користе у екстремним радним условима.

1. Експерименти су обухватили утврђивање зависности напона прага  $V_T$  и промене напона прага  $\Delta V_T$  као дозиметријских параметара од укупне апсорбоване дозе зрачења за случајеве различитих полупроводничких, структурних и конструкционих карактеристика МОСФЕТ-а, што се може да се постигне променама у дебљини оксида гејта, у допираности полупроводничке основе, у различитој врсти полупроводничког материјала, у присуству слојева за пасивизацију, у дужини и ширини канала између сорса и дрејна, као и у напону напајања гејта у току зрачења. Поља јонизујућих зрачења су била успостављана са изворима гама, X и електронског зрачења, различитих енергија зрачења, јачина доза зрачења, а електронске компоненте су биле изложене различитим укупним дозама зрачења. При томе, одређена је енергетска зависност промене напона прага  $\Delta V_T$  као одзива МОСФЕТ-а за изабрани тип инцидентног јонизујућег зрачења који се користи при анализи утицаја зрачења на електронску компоненту. Сваки експериментални поступак је био спроведен у контролисаним лабораторијским условима уз минимизацију мерне несигурности.

2. Остварена је примена нумеричких симулација на основу метода Монте Карло при транспорту честица јонизујућег зрачења кроз геометријску конфигурацију МОСФЕТ структуре. На крају овог прорачуна један од резултата су вредности депоноване енергије у запремини сваке материјалне зоне структуре МОСФЕТ-а. Одатле следи да се полазећи од прорачунатих вредности депоноване енергије, уз коришћење фундаменталне дефиниције у дозиметрији зрачења, одређују вредности апсорбоване дозе у оксиду гејта ( $\text{SiO}_2$ ) и супстрату (Si) као величине које су преко одговарајућих релација повезане са дозиметријским параметрима МОСФЕТ-а. Променом типа инцидентних честица (фотони или електрони), као и енергија честица чији се транспорт симулира кроз све материјалне зоне МОСФЕТ-а, утврђује се зависност апсорбоване дозе у дозиметријски осетљивој запремини оксида гејта, као и у супстрату, од енергије јонизујућег зрачења.

3. Резултати научних истраживања показују да јонизујуће зрачење може довести до функционалног или трајног оштећења полупроводничких направа различитог типа у екстремним радним условима (у окружењу нуклеарног реактора, акцелераторске инсталације, нуклеарне експлозије или приликом тестирања направа за експлоатацију у космосу). У задњих неколико деценија, побољшања карактеристика електронских компоненти типа МОСФЕТ су омогућила убрзани напредак у технологији израде

интегрисаних кола. При томе, приликом проширења области у којима се користе, постављају се захтеви за све већим степеном минијатуризације МОСФЕТ компоненти. На тај начин се успоставио специфичан тренд у истраживању и развоју нових типова МОСФЕТ-а, који у себи има одредницу да се разматрања физичких појава и техничких решења унапређују на нивоу микроелектронике, али и да се остварује постепени напредак према наноелектроници.

Оригиналност дисертације се може сагледати из садржаја и резултата публикованих радова у међународним часописима који су проистекли из ових истраживања. У складу са тим, закључује се да је тематика дисертације веома актуелна у научно-истраживачком, у техничко-технолошком и практично-апликативном смислу, како на међународном тако и на националном нивоу.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Приликом израде ове дисертације, кандидат је користио релевантну литературу из области нуклеарне технике и физичке електронике, нуклеарне и атомске физике, детекције зрачења, полупроводничких материјала, примене нумеричког метода Монте Карло при симулацији интеракције јонизујућег зрачења са материјалом и примене експерименталних мерних техника за одређивање карактеристика електронских компоненти. Списак литературе се састоји од укупно 60 референци укључујући и радове кандидата који се односе на тему докторске дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе примењене у истраживањима приказаним у оквиру докторске дисертације кандидата мр Србољуба Станковића су укључивале:

- проучавање релевантне научно-истраживачке литературе посвећене тематици дисертације, што је урађено на квалитетан начин, без пропуштања најбитнијих извора;
- у складу са стандардним метролошким методама, уз коришћење система са јонизационим коморама и електрометром обављена су мерења јачине керме у ваздуху и јачине апсорбоване дозе у води у пољима јонизујућег зрачења (гама извора Со-60, високоенергетског X и електронског зрачења из линеарног акцелератора) у склопу припрема за озрачивање МОСФЕТ компоненти;
- применом математичке релације која прати законитости радијационе физике, полазећи од измерене вредности дозиметријске величине керме у ваздуху ( $K_{\text{air}}$ ) или апсорбоване дозе у ваздуху са одговарајућима факторима конверзије долази се до вредности за апсорбовану дозу у силицијум диоксиду  $D(\text{SiO}_2)_{\text{exp}}$  на месту где ће у експерименту бити постављена МОСФЕТ компонента, током озрачивања;
- у експерименталном делу рада, у пољу јонизујућег зрачења су обављена мерења промене напона прага МОСФЕТ-а, који ради у области засићења, у зависности од промене апсорбоване дозе зрачења. Поред „статичког“ режима мерења, реализована су мерења и аутоматским мерним системом при чему је МОСФЕТ компонента инкорпорирана у дигитални мерни систем који је програмиран да у задатим временским интервалима региструје вредност напона прага у „динамичком“ on-line режиму мерења;
- спроведена је примена нумеричких симулација транспорта фотона и електрона, као честица јонизујућег зрачења, кроз материјалну средину на бази метода Монте Карло, при чему се коришћењем софтверског пакета ФОТЕЛП за резултат добијају вредности депоноване енергије у запремини сваке материјалне зоне у структури МОСФЕТ-а, а потом се прорачунава и апсорбована доза у оксиду гејта  $D(\text{SiO}_2)_{\text{MC}}$ ;

- извршене су опсежне Монте Карло симулације интеракција јонизујућег зрачења са различитим структурама МОСФЕТ компоненти у циљу дефинисања фактора физичке заштите који је важан са аспекта избора материјала за оклапање МОС транзистора;
- нумеричко, графичко и текстуално приказивање постигнутих резултата, њихова дискусија и анализа;
- стављање добијених резултата у контекст постојећих метода приказаних у релевантној литератури.

Примењене научне методе у потпуности су адекватне тематици, одговарају највишим стандардима научноистраживачког рада и у сагласности су са циљевима зацртаним на почетку израде докторске дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати у дисертацији кандидата мр Србољуба Станковића омогућавају да се успостави примена специфичне методологије којом се прецизније прати утицај јонизујућег зрачења на карактеристике МОСФЕТ компоненте. Специфичност се огледа у томе да поред тога што се одређује зависност промене напона прага од експериментално одређене апсорбоване дозе у МОСФЕТ-у који се налази у пољу јонизујућег зрачења, уведе се и Монте Карло прорачуни величина од којих зависе дозиметријски параметри структуре МОСФЕТ-а и сагледава се њихова веза са резултатима експеримента. Пажљивом анализом нежељених ефеката утицаја зрачења могу да се сагледају рационалне методе које би те ефекте свеле на минимум или их елиминисали. Поред тога, практичну примену има и приказана метода одређивање фактора физичке заштите којим се може извршити избор одговарајућих материјала за оклапање МОС транзистора који би били погодни за услове у којима би се користила МОСФЕТ компонента. Једна од основних карактеристика дисертације јесте да се ради о резултатима који повезују најсавременију тематику са конкретном применом не само у даљим научним истраживањима, већ и у великом броју различитих практичних поља, како у земљи, тако и на међународном нивоу.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу садржаја докторске дисертације може се закључити да је кандидат испољио способност сагледавања предмета истраживања тако да постављени проблем решава избором неколико различитих метода које имају за циљ да се оствари оригиналан резултат истраживања. Кандидат је показао изузетну посвећеност теоријском и експерименталном раду и испољио је иницијативу за самостално решавање проблема. Према изложеном у дисертацији кандидат је потпуно овладао методологијом рада у оквиру техничких и природних наука. Свиме тиме мр Србољуб Станковић је показао своју научну компетентност и пуну способност за квалитетан самостални научни рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси кандидата мр Србољуба Станковића приказани у његовој дисертацији укључују:

1. Истраживање на основу којих се дошло до резултата који су омогућили да се оцене могућности примене метода „статичког“ и „динамичког“ on-line мерења за утврђивање експерименталне релације између промене напона прага  $\Delta V_T$ , као дозиметријског

- параметра МОС транзистора, и апсорбоване дозе зрачења  $D(\text{SiO}_2)_{\text{exp}}$  у стандардним пољима гама, X или електронског зрачења;
2. За МОСФЕТ компоненте са различитим карактеристикама добијени су резултати на основу којих су изведени закључци у погледу репродукцибилности одзива, енергетске зависности одзива, утицаја слоја за пасивизацију од силицијум нитрида на одзив МОС транзистора у пољу јонизујућег зрачења, који имају велики практични значај;
  3. Истраживањима је закључено да нема значајног утицаја промене геометријске конфигурације у зони оксида гејта (за различите димензије дужине и ширине канала између дрејна и сорса) на зависност промене напона прага МОС транзистора од апсорбоване дозе јонизујућег зрачења;
  4. Примене нумеричких симулација транспорта фотона и електрона, као честица јонизујућег зрачења, кроз материјалну средину на бази метода Монте Карло, при чему се као резултат добијају вредности депоноване енергије у запремини сваке материјалне зоне у структури МОСФЕТ-а, а потом се прорачунава и апсорбована доза у оксиду гејта  $D(\text{SiO}_2)_{\text{MC}}$ ;
  5. Приказана је методологија заснована на Монте Карло прорачунима за одређивање вредности фактора физичке заштите МОСФЕТ-а за различите изабране материјале који могу да се користе за оклапање изабране полупроводничке компоненте у случајевима када се мења енергија инцидентних честица у пољу јонизујућег зрачења;
  6. Истраживање у којем је утврђена релација између експериментално одређене зависности промене напона прага као дозиметријског параметра МОСФЕТ-а од укупне апсорбоване дозе у пољу јонизујућег зрачења, и прорачунатих вредности апсорбоване дозе у дозиметријски осетљивој запремини оксида гејта које су добијене као резултат Монте Карло симулација за транспорт фотона и електрона као честица јонизујућег зрачења кроз структуру МОСФЕТ-а.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Детаљнија разматрања научних доприноса који су наведени у тачки 4.1 показују да разлика између измерених резултата „статичког“ система MESY2002 и аутоматског on-line система MESY2014 (са „динамичким“ режимом мерења) се налази у границама експерименталне мерне несигурности од 2% до 5%. То значи да се може закључити да је одзив МОСФЕТ компоненте независан од начина мерења, односно не зависи од тога да ли је полупроводничка компонента била инкорпорирана у „статички“ или „динамички“ on-line систем мерења.

У поступку дизајнирања МОСФЕТ компоненте важну улогу игра одлука о избору материјала за оклапање структуре. Овај инжењерски проблем је такође предмет посебног истраживања у којем се спроводе нумерички прорачуни на бази Монте Карло симулација за МОСФЕТ структуре са и без материјалне зоне којом се врши оклапање и на тај начин се дефинише фактор физичке заштите компоненте. Сложенија ситуација постоји када за једну врсту јонизујућег зрачења и различите енергије инцидентних честица одређујемо утицај на одзив компоненте приликом измене различитих материјала који се користе за оклапање компоненте. Решење се проналази тако што могу да се спроведу нумерички прорачуни који дефинишу скуп вредности дозиметријског параметра МОСФЕТ-а са различитим вредностима фактора физичке заштите који се односи на изабрани материјал за оклапање у зависности од врсте и од енергије зрачења. Енергетска зависност фактора физичке заштите је посебно од великог значаја при доношењу закључака о коришћењу МОСФЕТ-а у окружењу са мешовитим пољем јонизујућих зрачења.

Оптимизација карактеристика МОСФЕТ дозиметра се може остварити комплементарним приступом користећи резултате експерименталних истраживања и



нумеричких симулација транспорта честица јонизујућих зрачења применом метода Монте Карло. Треба истакнути вредност истраживања између експериментално одређене зависности промене напона прага као дозиметријског параметра МОСФЕТ-а од укупне апсорбоване дозе у пољу изабраног типа јонизујућег зрачења, и прорачунатих вредности величина, које су добијене као резултати нумеричких симулација за транспорт честица датог јонизујућег зрачења кроз структуру МОСФЕТ-а, као што је апсорбована доза у дозиметријски осетљивој запремини оксида гејта.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током истраживања везаних за докторску дисертацију, кандидат мр Србољуб Станковић је као првопотписани аутор објавио десет научних радова у међународним часописима са SCI листе. Поред тога, из проблематике којом се бави докторска дисертација овде је наведен још један рад саопштен на конференцији од међународног значаја и један рад у часопису националног значаја. Радови који директно верификују научни допринос истраживања које је презентовано у докторској дисертацији кандидата су наведени на следећем списку:

##### Категорија M22:

1. **Stanković J. Srboljub**, Iričanin Bratislav, Nikolić Dragana, Janković Ksenija, Radenković Mirjana, Stanković Koviljka, Osmokrović Predrag: *MSV signal processing system for neutron-gamma discrimination in a mixed field*, NUCLEAR TECHNOLOGY AND RADIATION PROTECTION, (2012), Vol. 27, No. 2, pp. 165-170. Vinca Institute of Nuclear Sciences ISSN 1451-3994, doi: 10.2298/ntrp1202165s, IF=1.000
2. **S. Stanković**, R. Ilić, P. Osmokrović, B. Lončar, A. Vasić.: *Computer simulation of gamma irradiation energy deposition in MOSFET dosimeters*, IEEE Transactions on Plasma Science, (2006) Vol. 34, No. 5, pp. 1715-1718. ISSN 0093-3813, doi:10.1109/PPC.2005.300699, IF=1.144

##### Категорија M23:

1. **Stanković Srboljub J.**, Ilić Radovan, Živanović Miloš, Janković Ksenija, Lončar Boris: *Monte Carlo Analysis of the Influence of Different Packaging on MOSFET Energy Response to X-rays and Gamma Radiation*, ACTA PHYSICA POLONICA A, (2012), Vol. 122, No. 4, pp. 655-658. Polish Academy of Sciences - Institute of Physics ISSN 0587-4246, IF=0.531
2. **Stankovic Srboljub J.**, Ilic Radovan, Jankovic Ksenija, Vasic-Milovanovic Aleksandra, Loncar Boris: *Characterization of New Structure for Silicon Carbide X-Ray Detector by Method Monte Carlo*, ACTA PHYSICA POLONICA A, (2011) Vol. 120, No. 2, pp. 252-255. Polish Academy of Sciences - Institute of Physics ISSN 0587-4246, IF=0.444
3. **S.J. Stankovic**, R.D. Ilic, K. Jankovic, D. Bojovic, B. Loncar: *Gamma Radiation Absorption Characteristics of Concrete with Components of Different Type Materials*, Acta Physica Polonica A, (2010) Vol. 117, No.5, pp. 812-816. Polish Academy of Sciences - Institute of Physics ISSN 0587-4246, IF=0.467
4. **S.J. Stankovic**, R.D. Ilic, D.M. Davidovic, M. Petrovic, S. Tadic, M. Kovacevic: *Radiation Absorption Characteristics of Titanium Alloys*, Acta Physica Polonica A, (2009) Vol. 115, No.4, pp.820-822. Polish Academy of Sciences - Institute of Physics ISSN 0587-4246, IF=0.433
5. **S.J. Stankovic**, R.D. Ilic, D.M. Davidovic, M. Petrovic: *Characterization of X-Ray Diamond Detector by Monte Carlo Method*, Acta Physica Polonica A, (2009) Vol. 115, No.4, pp.816-819. Polish Academy of Sciences - Institute of Physics ISSN 0587-4246, IF=0.433
6. **S.J. Stankovic**, R.D. Ilic, O.Ciraj-Bjelac, M. Kovacevic and D. Davidovic: *Characterization of Target Material for X-Ray Generator by Monte Carlo Method*, Material Science Forum, (2007) Vol.555, pp.137-140. ISSN 0255-5476, doi:10.4028/www.scientific.net/msf.555.137, IF=0.399

7. **S.J. Stankovic**, M. Petrovic, M. Kovacevic, A. Vasic, P. Osmokrovic and B. Loncar: *Monte Carlo Calculation of X-Rays Deposited Energy in CdZnTe Detector*, Material Science Forum, (2007) Vol.555, pp.141-146. ISSN 0255-5476, doi:10.4028/www.scientific.net/msf.555.141, IF=0.399

8. **S. Stanković**, R. Ilić, M. Petrović, B. Lončar, A. Vasić.: *Radiological characterization of semiconductor materials in field effect transistor dosimeter by Monte Carlo method*, Materials Science Forum, (2006) Vol. 518, pp. 361-366. ISSN 0255-5476, doi:10.4028/www.scientific.net/msf.518.361, IF=0.399

#### Категорија M33:

1. **Stankovic S.J.**, Ilic R.D., Lazarevic D., Fetahovic I., Obrenovic M., Iricanin B., "Correlation between MOSFET dosimeter energy response and its shielding material in electron-beam radiation environment", Pulsed Power Conference (PPC), (2015) IEEE, May 31 -June 4 2015, Austin, TX, USA, Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/PPC.2015.7296888

#### Категорија M52:

1. **Srboljub J. Stankovic**, Radovan D. Ilic, Milos Davidovic, Miloško Kovacevic, Dragomir Davidovic, "Influence of packaging configuration with kovar lid on radfet response to proton irradiation". Nuclear Technology and Radiation Protection, Vol.XXIII, No.1, pp.37 – 40. (2008) Vinca Institute of Nuclear Sciences ISSN 1451-3994

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Србољуба Станковића, под насловом „Експериментална карактеризација и Монте Карло симулација дозиметријских параметара МОСФЕТ структуре у пољима јонизујућег зрачења”, написана је у потпуности у складу са описом и образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе захтеване Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.


Дисертација је урађена у складу са стандардима научноистраживачког рада и садржи значајне доприносе научним областима нуклеарне технике и физичке електронике. Најзначајнији резултати су приказани у примени методологије која је заснована на Монте Карло прорачунима за одређивање вредности фактора физичке заштите МОСФЕТ-а за различите изабране материјале који могу да се користе за оклапање изабране полупроводничке компоненте у случајевима када се мења енергија инцидентних честица у пољу јонизујућег зрачења. Такође, од посебног су значаја резултати истраживања у којем је утврђена релација између експериментално одређене зависности промене напона прага као дозиметријског параметра МОСФЕТ-а од укупне апсорбоване дозе у пољу јонизујућег зрачења, и прорачунатих вредности апсорбоване дозе у дозиметријски осетљивој запремини оксида гејта које су добијене као резултат Монте Карло симулација за транспорт фотона и електрона као честица јонизујућег зрачења кроз структуру МОСФЕТ-а. Дисертација представља конзистентну и заокружену целину која обједињује спроведене експерименте и нумеричке симулације са практичном применом. Текст је јасно структуриран и прецизан.

Оцењујемо да је докторска дисертација савремена по питању коришћених материјала и метода који су били и адекватни за дату тему. Научни допринос је верификован у објављеним резултатима проистеклих из истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације. Током истраживања везаних за докторску дисертацију, кандидат мр Србољуб Станковић је као првопотписани аутор објавио десет научних радова у међународним часописима са SCI листе.

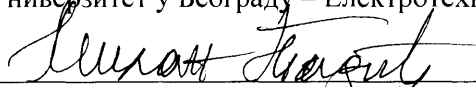
На основу свега изнетог, Комисија закључује да је својом докторском дисертацијом мр Србољуб Станковић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Због тога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „**Експериментална карактеризација и Монте Карло симулација дозиметријских параметара МОСФЕТ структуре у пољима јонизујућег зрачења**” кандидата мр Србољуба Станковића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 20.05.2016. године


#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



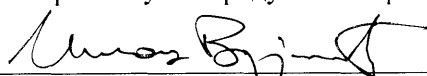
др Милан Тадић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Бранко Матовић, научни саветник  
Институт за нуклеарне науке Винча



др Вујо Дрндаревић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милош Вујисић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет