

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Marije D. Obrenović**, master inženjera

Odlukom br. 35/280 na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta održanoj 31.10. 2019. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije kandidata **Marije D. Obrenović, master inženjera elektrotehnike i računarstva**, pod naslovom:

**"Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala"**

Posle pregleda dostavljene disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

**REFERAT**

**1. UVOD**

**1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije**

- Školske 2017/2018 godine, kandidat Marija D. Obrenović, master inženjer elektrotehnike i računarstva, upisala je doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet – studijski program Inženjerstvo materijala, pod rukovodstvom mentora dr Aca Janićijevića, vanrednog profesora Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.
- 21. 08. 2019. godine kandidat Marija D. Obrenović, master inženjer elektrotehnike i računarstva je prijavila temu doktorske disertacije pod nazivom: *"Mogućnost primene*

*komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala“*

- 29.08.2019. godine na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata, Marije D. Obrenović, master inženjera elektrotehnike i računarstva, za izradu doktorske disertacije pod nazivom: "*Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala“* (Odluka br. 35/280 od 29.08.2019.god).
- 19. 09. 2019. godine – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu doneta je Odluka br. **35/293** o prihvatanju Referata Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata u kojoj se odobrava izrade doktorske disertacije, Marije D. Obrenović, master inženjera elektrotehnike i računarstva, pod novim nazivom: „ *Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala* “. Za mentora ove doktorske disertacije određen je dr Aco Janićijević, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.
- 03. 10. 2019. godine – Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost (Odluka 02 br. 61206-3909/2-19) na predlog teme doktorske disertacije Marije D. Obrenović, master inženjera elektrotehnike i računarstva, pod nazivom "*Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala“* na osnovu zahteva Tehnološko-metalurškog fakulteta, broj 35/301 od 25. 09. 2019. godine
- 31.10. 2019. godine na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju Komisije za ocenu doktorske disertacije, Marije D. Obrenović, master inženjera elektrotehnike i računarstva , pod nazivom: "*Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala“* (Odluka br. 35/333 od 31.10.2019.god.).

## **1.2. Naučna oblast disertacije**

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, za koju je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu matična ustanova. Mentor dr Aco Janićijević, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, je do sada publikovao 16 radova (4 M21, 3 M22 i 9 M23) iz ove oblasti u časopisima koji se nalaze na SCI listi što govori o kompetentnosti da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

## **1.3. Biografski podaci o kandidatu**

Marija D Obrenović je rođena 27.11.1983. u Beogradu, gde je 1998. godine završila osnovnu školu "Ivan Goran Kovačić" kao odličan učenik. Tokom školovanja se istakla na brojnim takmičenjima iz matematike i fizike. Iste godine upisuje XIV Beogradsku gimnaziju, prirodno-matematički smer, koji završava četiri godine kasnije sa odličnim uspehom. 2002/03.godine upisuje Fakultet organizacionih nauka, Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 2009. godine na temu "Ekološki aspekti proizvodnje električne energije" sa ocenom 10 na diplomskom radu i prosečnom ocenom 8,03 na diplomskim studijama. Postaje jedan od osnivača studentske organizacije ESTIEM i kao jedan od 20 najboljih studenata Evrope, prisustvuje brojnim seminarima širom Evrope, od kojih se održavaju konferencije na METU Univerzitetu i Univerzitetu Kembridž.

Nakon završenih diferencijalnih ispita na Elektrotehničkom fakultetu, 2011. godine upisuje master studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru biomedicinsko i ekološko inženjerstvo, koji završava početkom 2012. godine sa prosečnom ocenom 9,83, i postaje master inženjer elektrotehnike i računarstva. Tema njenog završnog master rada bila je "Uticaj niskofrekventnog zračenja elektroenergetskih sistema na žive organizme".

Doktorske studije upisala je školske 2012/13. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na Modulu za nuklearnu, medicinsku i ekološku tehniku, gde je završila sve zadatke predviđene planom i programom doktorskih studija i do sada je položila sve predmete na doktorskim studijama, sa prosečnom ocenom 10.

Godine 2017/18. upisala je i doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na odseku Inženjerstvo materijala, gde je uspešno položila sve ispite propisane studijskim programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 9,67, nakon čega prijavljuje temu doktorske disertacije pod nazivom „Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja”.

Govori engleski, ruski, italijanski, španski i ima srednji kurs nemačkog jezika.

### 1.3.1 Stečeno naučnoistraživačko iskustvo

Profesionalno angažovanje:

Od maja 2012. godine Marija D. Obrenović je zaposlena na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Marija D. Obrenović, u kategoriji istraživačka saradnika, učestvuje u projektu ON 171007 Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja "Fizički i funkcionalni aspekti interakcije zračenja sa električnim i biološkim sistemima", na kome je i dalje angažovana.

Kao rezultat dosadašnjeg angažovanja na projektu, Marija D. Obrenović je pokazala interesovanja za istraživanje u oblasti elektromagnetne i radijacione kompatibilnosti elektrotehničkih sistema i komponenata, a posebno interesovanje u oblasti interakcije zračenja sa izolacionim materijalima, kao i efektima tog zračenja. U cilju što uspešnijeg izvođenja kako studijsko-istraživačkog, tako i naučno-istraživačkog rada, Marija D. Obrenović je učestvovala u eksperimentalnim istraživanjima efekata interakcije zračenja materijala u Institutu za Nuklearne nauke "Vinča".

Tokom studija, pored predviđenih ispita, učestvovala je u izvođenju nastave iz računskih i laboratorijskih vežbi na predmetima osnovnih studija: Elektrotehnički materijali i Fizika 1.

Tokom svog dosadašnjeg naučno istraživačkog rada Marija D. Obrenović objavila je kao autor 4 i kao koautor 7 radova u časopisima sa SCI liste, a autor je i koautor više radova prezentovanih na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja, od kojih se ističu IEEE konferencije 2014 i 2015 u Santa Fee, New Mexico i Austin, Texas, USA.

U periodu doktorskih akademskih studija, kaandidat je položio sve predmete (ukupno 13) predviđene planom i programom doktorskih studija prosečnom ocenom 9,67 sa ostvarenih 80 ESPB. 08.07.2019. kandidat je odbranio Završni ispit pred komisijom u sastavu dr Rajko Šašić, redovni profesor Tmf-a, dr Boris Lončar, redovni profesor TMF-a i dr Boban Marinković, vanredni profesor TMF-a.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1. Sadržaj disertacije**

Doktorska disertacija Marije D. Obrenović, master inženjera, napisana je na 137 strana, i sadrži 7 poglavlja: Uvod, Teorijski deo: 1) Struktura i aktivnost atomskog jezgra, 2) Dejstvo zračenja na materijal, 3) Instrumenti za detekciju, spektrometriju i dozimetriju, 4) Dejstvo radioaktivnog zračenja na poluprovodnike, 5) Uticaj zračenja na poluprovodničke karakteristike MOS komponenti, 6) Eksperiment, 7) Rezultati i diskusija i Zaključak. Disertacija sadrži 42 slike, 7 tabele i 242 literaturna navoda. Na početku disertacije data je naslovna strana (na srpskom i engleskom), podaci o mentoru i članovima komisije, zahvalnica, skraćeni izvod (na srpskom i engleskom jeziku) i sadržaj, dok su Literatura i biografija autora dati na kraju disertacije.

Doktorska disertacija je urađena u svemu prema Pravilniku o doktorskim studijama koji je donet na sednici Nastavno-naučno veće Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu 06.10.2016 godine.

### **2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja**

Tema doktorske disertacije pripada naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo uže naučne oblasti inženjerstva materijala u kojoj se najveći fokus stavlja na uticaj radijacione otpornosti poluprovodničkih materijala i komponenata.

Metode koje će se ispitivati su disertaciji su teoretske i eksperimentalne. U okviru eksperimenata u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima određivane su absorbovane doze jonizujućeg zračenja sa kojima se vrši ozračivanje MOS tranzistora i izvršen je standardni postupak dijagnostike poluprovodničkih materijala i od njih napravljenih elektronskih komponenata i ispitivani su efekti koje jonizujuće zračenje proizvodi trajno i/ili privremeno na njih.

**U prvom poglavlju rada** je izložen opšti deo razvoja nuklearne fizike kroz istoriju, pojam defekta mase, zavisnost vezivne energije po nukleonu u funkciji masenog broja za stabilna jezgra, kao i sam pojam prirodne radioaktivnosti, zatim priroda elementarnih čestica kao i podela elementarnih čestica.

**U drugom poglavlju** je izloženo dejstvo zračenja na materijal, koje je podeljeno na dva dela, u prvom delu se razmatra o dejstvu korpuskularnog zračenja na materijal, dok je u drugom delu razmotreno dejstvo elektromagnetnog zračenja na materijal.

U prvom delu je dat kratak opis procesa interakcije, sudar čestica u laboratorijskom sistemu, sudar čestica u sistemu centra mase, pojam efikasnog preseka, sudar naelektrisanih čestica, gubitak energije sudarom, gubitak energije zračenjem, domet elektrona, takođe opisan je pojam efekta rasturanja, jonizacije u materijalu, kao i efekat zahvata i gubljenja elektrona, dok se u drugom delu razmatra pojam fotoelektričnog efekta, Komptonovog rasejanja, proizvodnje parova, Tomsonovog rasejanja, Rejlejevog rasejanja i nuklearnog fotoefekta ili fotodezintegracije.

**U trećem poglavlju** je obrađena tema instrumenata za detekciju, spektrometriju i dozimetriju, od kojih je poseban akcenat stavljen na poluprovodničke detektore. Na samom početku dat je kratak opis pojma detektora i spektrometra radioaktivnog zračenja, vrste detektora, opšte osobine detektora zračenja, kao i njihovi režimi rada, spektar amplituda impulsa, kriva brojanja, energetska rezolucija, efikasnost detekcije, kao i pojam mrtvog vremena. U delu poglavlja koji razmatra dejstvo poluprovodničkih detektora razmatrani su nosioci naelektrisanja u poluprovodniku, dejstvo jonizujućeg zračenja na poluprovodnik, inverzno polarisan p-n spoj, vrste poluprovodničkih detektora, kao i sama primena poluprovodničkih detektora.

**U četvrtom poglavlju** razmatrano je dejstvo radioaktivnog zračenja na poluprovodnike. Radioaktivno zračenje predstavlja značajnu pretnju za rad elektronskih uređaja koji zahtevaju visok nivo pouzdanosti. Dejstvo zračenja na elektronske komponente i poremećaj istih se naziva Single event upset (SEU) i predstavlja promenu stanja izazvanu niskoenergetskim jonima, elektromagnetnim ili nuklearnim zračenjem ili bilo kojom drugom smetnjom koja može doći do osetljivog dela u mikro-elektronskom uređaju, na primer u mikroprocesoru, poluvodičkoj memoriji ili tranzistorima napajanja. Greška u izlazu ili radu uređaja nastala kao rezultat udara (zračenja) naziva se SEU ili Soft error. SEU se ne smatra trajnim oštećenjem kod tranzistora, sklopova ili uređaja. U ovoj glavi dat je detaljan opis zasnovanosti pojava prilikom interakcije zračenja i navedenih elektronskih uređaja.

**U petom poglavlju razmatran** je uticaj zračenja na poluprovodničke karakteristike MOS komponenti. Ovo poglavlje je podeljeno na karakteristike MOS komponenti, na osnovnu klasifikaciju naelektrisanja na osnovu njihovog uticaja na strujno naponske karakteristike MOS tranzistora, uticaj IR i HCL procesa na MOS komponente, kao i na uticaj naelektrisanja u oksidu gejta i na međupovršni Si-SiO<sub>2</sub> na MOS komponente.

**U šestom poglavlju** je opisan standardni eksperimentalni postupak vršen u realnim poljima zračenja vršen u laboratoriji (Secondary Standard Dosimetry Laboratory) u Institutu za Nuklearne nauke Vinča, u kojoj je moguće veoma precizno određivanje doze zračenja. Prikazani su rezultati izvršenog merenja napona praga komercijalnih p-kanalnih VDMOS tranzistora snage u opsegu absorbovanih doza zračenja od 10 do 100 Gy. Korišćen je veći broj komponentata koje su odabrane tako da su im početne vrednosti napona praga veoma bliske (do 1 %).

Komponente su bile podeljene u dve grupe. Jedna grupa cje bila ozačivana bez polarizacije na gejtju, a druga grupa sa polarizacijom od +5 V. Ozračivanje obe grupe vršeno je istovremeno, tj. u istom polju zračenja. Takođe je ispitivan uticaj polarizacije gejtja tokom ozračivanja na osetljivost ovih tranzistora.

Doprinos pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja na SiO<sub>2</sub>-Si međupovršini, kao i promene praga napona su takođe prezentovane. Na osnovu ovih eksperimentalnih podataka i odgovarajuće teorijske analize došlo se do zaključka da li se ovi tranzistori mogu primeniti kao senzori i dozimetri jonizujućeg zračenja. Tokom ozračivanja snimane su potpragovske i prenosne karakteristike u zasićenju. Za ovu svrhu korišćen je instrument Keithley model 4200.

Nakon detaljne analize defekata koje jonizujuće zračenje izaziva u SiO<sub>2</sub> i na SiO<sub>2</sub>-Si međupovršini PMOS tranzistora, u sedmom poglavlju je razmatran i njihov uticaj na promenu napona praga kao osnovnog dozimetrijskog parametra. U ovom poglavlju su prikazani rezultati ponašanja p-kanalnih VDMOS tranzistora snage IRF9520, čija je debljina oksida 100 nm zatvorenih u standardno TO-220 kućište. Tranzistori su proizvedeni u kompaniji International Rectifier. Razmatrana je funkcionalna zavisnost između promene napona praga i absorbovane doze za različite vrednosti napona na gejtju tokom ozračivanja kod komercijalnih p-kanalnih VDMOS tranzistora snage koji su predmet istraživanja u predloženoj doktorskoj disertaciji.

Promena napona praga je određivana kao presek između VG ose i ekstrapolirane linearne oblasti zavisnosti  $(ID)^{1/2} - VG$  ( $ID$  predstavlja struju drejna dok  $VG$  predstavlja napon na gejtju). Za razdvajanje pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja korišćena je subthreshold-midgap tehnika. U cilju potvrde mogućnosti primene navedenih tranzistora kao senzora i dozimetara zračenja korišćen je model pomoću koga je uspostavljena zavisnost između promene napona praga i absorbovane doze. Pokazalo se da postoji linearna zavisnost između ovih veličina, pa se može smatrati da je osetljivost ista u opsegu razmatranih doza. To u značajnoj meri olakšava primenu navedenih tranzistora u dozimetrijske svrhe. Takođe, na osnovu rezultata gustine pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja formiranih tokom ozračivanja ustanovljen je njihov doprinos promeni napona praga. Dobijeni rezultati su poređeni sa ranije dobijenim rezultatima za dozimetrijske tranzistore (RADFET), čija je debljina oksida 100 nm, a proizvedeni su u Institutu Tyndall, Cork, Republika Irska. Na osnovu ovih podataka su izvedeni odgovarajući zaključci vezani za primenu razmatranih tranzistora kao dozimetara gama zračenja visokih doza

U Zaključku (**poglavlje 7**) su ukratko sumirani svi dobijeni rezultati u ovoj doktorskoj disertaciji i iznet je njihov značaj i mogući pravci daljeg istraživanja.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Sve veći stepen minijaturizacije elektronskih komponenata i sklopova, kao i stalni porast elektromagnetne i čestične kontaminacije životne sredine, dovodi do nepouzdanosti rada elektronskih uređaja. Kako je savremena civilizacija skoro potpuno zavisna od pouzdanosti rada savremene elektronike, njeno obezbeđivanje od šuma indukovanoj jonizujućim zračenjem, predstavlja prvorazredni problem projektovanja integrisanih komponenata visoke gustine pakovanja. To je posebno bitno u situaciji kada su elektronski sklopovi predviđeni za rad u uslovima povećanog polja jonizujućeg zračenja, kao što su nuklearna postrojenja, avioni i kosmičke letelice, kao i mnogi medicinski dijagnostički uređaji. Sa tim se povlači i pitanje radijacione otpornosti kao jedne od vrlo važnih karakteristika materijala. Pouzdanost rada uređaja zavisi od ove karakteristike i umnogome određuje kvalitet rada kao i dužinu veka komponenti. Složenost ispitivanja je velika jer su različite komponente od različitih proizvođača, izrađene od različitih materijala, upakovane na vrlo malom prostoru iz ekonomskih razloga proizvodnje. Masovna industrijska proizvodnja dovodi do toga da se pakuju komponente koje se nalaze na vrlo maloj udaljenosti izložene različitim strujnim i digitalnim efektima koji proizvode različite vrste jonizujućeg zračenja. Prema tome možemo konstatovati da svaka kombinacija različitih komponenti spojena u jednu celinu ima svoja specifična svojstva, koja čak zavise i od međusobnog rastojanja i uglova pod kojim se postavljaju, tako da se, praktično, svaka upakovana celina može posmatrati kao zaseban skup i mora kao takav ispitivati. Ovo dovodi do vrlo složenih metoda ispitivanja, različitih opterećenja komponenti i različitog uzajamnog dejstva koja mogu pogoršati karakteristike celine

Cilj ovog rada je da se ispita uticaj dejstva jonizujućeg zračenja na elektronske sklopove savremene generacije kao i mogućnost korišćenja tog uticaja za formiranje detektora i spektrometara izuzetno male komplikovane merne nesigurnosti .

U radu je istraživana pomeraj napona praga komercijalnih p-kanalnih snažnih VDMOSFET-a tokom ozračivanja gama zračenjem u opsegu doza od 10 do 100 Gy. Ozračivanje je vršteno bez prisustva napona na gejtu kao i sa naponom na gejtu od 5 V. Pokazalo se da postoji linearna zavisnost između pomeraja napona praga i apsorbirane doze zračenja za komponentu kod koje je napon na gejtu tokom ozračivanja iznosio 5 V. Gustine fiksnih i promenljivih centara su određivane iz podpragovskih I-V karakteristika korišćenjem midgap tehnike. Pokazano je da se tokom ozračivanja formira znatno veća gustina fiksnih centara zahvata. Takođe su analizirani mogući mehanizmi odgovorni za formiranje fiksnih i promenljivih centara zahvata tokom ozračivanja.



### **3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu**

Kandidat je tokom izrade doktorske disertacije izvršio pregled naučne i stručne literature iz relevantnih oblasti vezanih za problematiku disertacije, od kojih je izdvojio 242 literaturna navoda. Navedene reference sadrže eksperimentalne rezultate, analizu i diskusiju dobijenih rezultata i izvedene zaključke, kao i teorijske osnove primenjenih metoda ispitivanja, njihove mogućnosti i ograničenja. Kandidat je proširio do sada poznata saznanja o potencijalnim rizicima korišćenja popluprovodnika u ambijantelnim uslovima kada je prisutno radioaktivno zračenje. Posebno je prikazan uticaj dejstva jonizujućeg zračenja na elektronske sklopove savremene generacije kao i mogućnost korišćenja tog uticaja za formiranje detektora i spektrometara izuzetno male komplikovane merne nesigurnosti .

Iz obrazloženja predložene teme doktorske disertacije i objavljenih radova koje je kandidat priložio, kao i iz popisa literature koja je korišćena u istraživanju, uočava se adekvatno poznavanje predmetne oblasti istraživanja, kao i poznavanje aktuelnog stanja istraživanja u ovoj oblasti u svetu.

### **3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda**

Kako bi se potvrdile postavljene hipoteze, korišćene su opšte i posebne naučne metode istraživanja. Od opštih naučnih metoda istraživanja primenjene su: induktivno i deduktivno zaključivanje, komparacija, analiza i sinteza, apstrakcija i konkretizacija, generalizacija i specijalizacija.

Kao deo eksperimenata u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima, određivane su apsorbovane doze jonizujućeg zračenja koje će ozračiti MOS tranzistore. Za merenje naponskog praga korišćena je profesionalna oprema visoke pouzdanosti. Tokom eksperimenata, posebna pažnja je bila posvećena mernoj nesigurnosti tipa A i B. Teorijske metode zasnivane su na postavkama fiksne elektronike čvrstog stanja i teoriji interakcije jonizujućeg zračenja sa SiO<sub>2</sub>, što najviše utiče na promenu napona praga MOS tranzistora.

### **3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata**

Tema pripada oblasti Tehnološkog inženjerstva uže naučne oblasti Inženjerstva materijala u kome se najviši fokus stavlja na uticaj jonizujućeg zračenja na karakteristike MOS tranzistora.

Kao početak istraživanja uticaja jonizujućeg zračenja na MOS tranzistore može se smatrati 1964. godina i ona traju do današnjih dana. Cilj ovih istraživanja je da se proizvedu tranzistori otporni na zračenje, čije se karakteristike ne bi značajno menjale prilikom ugradnje u uređaje koji se koriste u sredinama gde je prisutno jonizujuće zračenje kao što su nuklearna energetska postrojenja, medicinsku uređaji koji koriste nuklearno i X-zračenje.

U toku ovih istraživanja javila se i ideja da bi MOS tranzistori mogli da se koriste za merenje apsorbirane doze jonizujućeg zračenja. Tako je 1970. godine objavljen prvi izveštaj o mogućnosti primene MOS tranzistora kao dozimetra jonizujućeg zračenja i ova ideja je verifikovana rezultatima koji su objavljeni 1974. godine. Nastavak ovih istraživanja je doveo do projektovanja i realizacije p-kanalnog MOS tranzistora sa aluminijskim gejtom koji je osetljiv na jonizujuće zračenje pod nazivom RADFET (koji potiče od engleskog naziva RADiation sensitive Field Effect Transistor) ili PMOS dozimetar. Princip rada ovog tranzistora zasniva se na merenju napona praga pri čemu je promena napona praga proporcionalna absorbovanoj dozi zračenja.

Danas se PMOS dozimetri primenjuju u više oblasti kao što su lična dozimetrija, u oblastima medicine kao što su radiologija i radioterapija, u nuklearnoj industriji i u kosmičkim istraživanjima (na stelitima). Glavna prednost PMOS dozimetara u odnosu na jonizacione komore, poluprovodničke diode i termoluminiscentne dozimetre je to što oni poseduju veoma malu zapreminu tako da se mogu koristiti u in vivo dozimetriji za merenje absorbovane doze u unutrašnjosti organizma čoveka. Zahvaljujući malim dimenzijama radijaciono osetljive oblasti ovi dozimetri se mogu koristiti za merenje doza u radijacionim poljima čije su vrednosti različite u različitim tačkama što je slučaj kod snopa X-zraka. Pored ovih postoje i druge prednosti PMOS dozimetara u odnosu na ostale, a to su mogućnost trenutnog ili kasnijeg očitavanja doze, dobra reproduktabilnost, mogućnost integracije sa drugim detektorima i/ili elektronikom, širok opseg merenja absorbovanih doza, tačnost, relativno mala snaga.

Zadnjih godina pojavila se ideja da se komercijalni p-kanalni PMOS tranzistori koriste kao dozimetri jonizujućeg zračenja. Ako bi se ova ideja realizovala dobili bi se PMOS dozimetri znatno niže cene od specijalno projektovanih PMOS dozimetrijskih tranzistora koji se koriste u dozimetriji jonizujućeg zračenja. Do sada je istraživano nekoliko tipova komercijalnih PMOS tranzistora kao dozimetara gamma, X i elektronskog zračenja. To su na primer tranzistori tipa 3N163 proizvedeni u kompaniji Vishay-Silconix, Malvern, USA, B5250F, ZVP3306 i ZVP4525 proizvedeni u kompaniji Diodes Incorporated kao i PMOS tranzistori iz integrisanih kola CD4007 proizvedeni u kompanijama Texas Instruments i NXP Semiconductors. Dobijeni rezultati su pokazali da postoji mogućnost primene ovih tranzistora kao dozimetara za merenje absorbovanih doza koje su reda nekoliko desetina greja.

### **3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad**

Kandidat Marija Obrenović master inženjer elektrotehnike i računarstva, je tokom izrade doktorske disertacije ispoljila stručnost i angažovanost u pripremi i realizaciji eksperimentalnih istraživanja efekata interakcije zračenja materijala.

To se ogleda, pre svega, u potpuno samostalnom kreiranju i realizaciji istraživanja kako u vezi sa temom doktorske disertacije tako i kroz rad koji realizuje u okviru svog profesionalnog angažovanja.

Iz oblasti istraživanja kojoj pripada tema doktorske disertacije, do sada je objavila 1 rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21) i jedan rad u međunarodnom časopisu (M22) i 9 radova u međunarodnom časopisu (M23), 3 naučna saopštenja u zbornicima radova sa međunarodnog naučnog skupa štampano u celini (M33). Na osnovu iznetih podataka može se zaključiti da Marija Obrenović poseduje sve kvalitete koji su neophodni za naučno-istraživački rad i samostalnu prezentaciju dobijenih rezultata.

Naime, kandidat master inženjer elektrotehnike i računarstva, Marija D. Obrenović, zaposlena je od 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, i u kategoriji istraživača saradnika učestvuje na projektu ON 171007 Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja "Fizički i funkcionalni aspekti interakcije zračenja sa elektrotehničkim i biološkim sistemima", na kome je i dalje angažovana.

Kao rezultat dosadašnjeg angažovanja na Projektu, Marija Obrenović je pokazala interesovanje za istraživanja u oblasti elektromagnetne i radijacione kompatibilnosti elektrotehničkih sistema i komponenata, a posebno interesovanje u oblasti interakcije zračenja sa izolacionim materijalima, kao i efektima tog zračenja. U cilju što uspešnijeg izvođenja studijsko istraživačkog, kao i naučno istraživačkog rada, Marija Obrenović je učestvovala u eksperimentalnim istraživanjima efekata interakcije zračenja materijala u Institutu za Nuklearne nauke "Vinča", odakle i proističe interesovanje za temu doktorata.

U toku studija je pored svojih predviđenih ispitnih zadataka, učestvovala u nastavi u izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi na predmetima osnovnih studija: Elektrotehnički materijali i Fizika 1.

Tokom svog dosadašnjeg naučno istraživačkog rada Marija Obrenović, objavila je, kao autor 4 i kao koautor 7 radova u časopisima sa SCI liste, a autor je i koautor više radova prezentovanih na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja, od kojih se posebno izdvajaju IEEE konferencije, 2014. i 2015. godine u Santa Fee, New Mexico i Austin, Texas, USA.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### **4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa**

U radu su prikazani rezultati ponašanja p-kanalnih VDMOS tranzistora snage IRF9520, čija je debljina oksida 100 nm zatvorenih u standardno TO-220 kućište. Tranzistori su proizvedeni u

kompaniji International Rectifier. Uzorci su ozračivani gama zračenjem u opsegu absorbovanih doza od 10 do 100 Gy. Korišćen je veći broj komponenata koje su odabrane tako da su im početne vrednosti napona praga veoma bliske (do 1 %). Komponente su bile podeljene u dve grupe.

Jedna grupa je ozačivana bez polarizacije na gejtu, a druga grupa sa polarizacijom od +5 V. Ozračivanje obe grupe vršeno je istovremeno, tj. u istom polju zračenja. Ozračivanje se obavljalo u laboratoriji (Secondary Standard Dosimetry Laboratory) u Vinči u kojoj je moguće veoma precizno određivanje doze zračenja. Tokom ozračivanja snimane su potpragovske i prenosne karakteristike u zasićenju. Za ovu svrhu korišćen je instrument Keithley model 4200. Promena napona praga je bila određivana kao presek između VG ose i ekstrapolirane linearne oblasti zavisnosti  $(ID)^{1/2} - VG$  (ID predstavlja struju drena dok VG predstavlja napon na gejtu). Za razdvajanje pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja korišćena je subthreshold-midgap tehnika. U cilju potvrde mogućnosti primene navedenih tranzistora kao senzora i dozimetara zračenja korišćen je model pomoću koga je uspostavljena zavisnost između promene napona praga i absorbovane doze. Ukoliko se pokaže da postoji linearna zavisnost između ovih veličina, onda se može smatrati da je osetljivost ista u opsegu razmatranih doza. To bi u značajnoj meri olakšalo primenu navedenih tranzistora u dozimetrijske svrhe. Takođe, na osnovu rezultata gustine pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja formiranih tokom ozračivanja ustanovljen je se njihov doprinos promeni napona praga. Dobijeni rezultati su bili upoređeni sa ranije dobijenim rezultatima za dozimetrijske tranzistore (RADFET), čija je debljina oksida 100 nm, a proizvedeni su u Institutu Tyndall, Cork, Republika Irska. Na osnovu ovih podataka su bili izvedeni odgovarajući zaključci vezani za primenu razmatranih tranzistora kao dozimetara gama zračenja visokih doza.

Dobijeni rezultati predstavljaju doprinos razumevanju fundamentalnih postulata fizičke elektronike čvrstog stanja i teorije i prakse po pitanju interakcije jonizujućeg zračenja sa poluprovodnicima, koja najviše utiče na pomeraj napona praga MOS tranzistora.

Naučni doprinosi ove doktorske disertacije ogledaju se u sledećem:

- Izvršena su merenja napona praga komercijalnih p-kanalnih VDMOS (Vertical Double-Diffused MetalOxide-Semiconductor) tranzistora snage u opsegu absorbovanih doza zračenja od 10 do 100 Gy.
- Takođe, sprovedeno je ispitivanje uticaja polarizacije gejta tokom ozračivanja na osetljivost ovih tranzistora.
- U okviru eksperimenata u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima je određena absorbovane doze jonizujućeg zračenja sa kojima se vrši ozračivanje MOS tranzistora. Tokom merenja napona praga korisila se profesionalna oprema visoke pouzdanosti, a eksperimentom je posebna pažnja posvećena mernoj nesigurnosti tipa A i B.

- Prezentovan je doprinos pozitivnog naelektrisanja u oksidu i površinskih stanja na SiO<sub>2</sub>-Si međuporšini promeni napona praga.
- Na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka i odgovarajuće teorijske analize ustanovljen je zaključak kojim se tranzistori mogu primeniti kao senzori i dozimetri jonizujućeg zračenja.

#### **4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja**

Sagledavanjem ciljeva i postavljenih hipoteza u odnosu na dobijene rezultate, može se konstatovati da prikazana istraživanja u potpunosti zadovoljavaju kriterijume jedne doktorske disertacije. Uvidom u dostupnu literaturu iz ove oblasti, kao i u rezultate koji su dobijeni primenom adekvatne metodologije, može se konstatovati da su korišćene metode u skladu sa savremenim metodama i da su rezultati u ovoj doktorskoj disertaciji značajni sa naučnog aspekta.

#### **4.3. Verifikacija naučnih doprinosa**

Kandidat Marija Obrenović, master inženjer., je svoje rezultate potvrdila objavljivanjem radova u međunarodnim časopisima i saopštenjima. Iz disertacije su proistekla jedanaest radova koji su objavljeni u međunarodnim časopisima (1 rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21) i dva rada u istaknutom međunarodnom časopisu (M22)) i 7 radova u međunarodnom časopisu (M23) i 3 naučna saopštenja u zbornicima radova sa međunarodnog naučnog skupa štampano u celini (M33), kao i jedan rad štampan u celini u zborniku nacionalnog značaja. (M63).

#### **Radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja – M20**

##### **M21- Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima**

[1] I. Knežević, **M. Obrenović**, Z. Rajović, B. Iričanin, P. Osmokrović, Simulation of Ion beam Irradiation effects in perovskite oxide memristors, Trans Tech Publications, Advanced Materials Research, 2014, Vol.906,pp.89-95, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.906.89. ISSN: 10226680.

## **M22- Radovi u istaknutim međunarodnim časopisima**

- [1] **M. Obrenović**, Đ. Lazarević, E. Dolićanin, M. Vujisić, Effects of Ion Beam on the Flash Memory Cells, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2014, Vol. 29, No. 2, pp. 116-122, DOI: 10.2298/NTRP14021160 ISSN:1451-3994 (if:0.560)..
- [2] D. Nikolić, A. Vasić-Milovanović, **M. Obrenović**, E. Dolićanin, Effects of successive Gamma and Neutron Irradiation on Solar Cells, Journal of Optoelectronic and Advanced materials, Vol. 17, No. 3-4, March- April 2015, p.351-365 ISSN: 14544164, (if:0.383).

## **M23-Radovi u međunarodnim časopisima**

- [1] **M. Obrenović**, A. J. Janićijević, D. Arbutina, Statistical Review of the Insulation Capacity of Geiger Muller Counter, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2018, Vol XXXIII, No 4,pp.369-374, DOI:10.2298/NTRP1809130090. ISSN:1451-3994 (if:0.614).
- [2] **M. Obrenovic**, Milić M. Pejovic, Đorđe R. Lazarevic, Nenad M. Kartalovic, Effects induced by Gamma-ray responsible for threshold voltage shift of commercial p-channel power VDMOSFETs, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2018,Vol.33, No.1, pp. 81-86, DOI:10.2298/NTRP18010810. ISSN:1451-3994 (if:0.614).
- [3] **M. Obrenovic**, Đ. Lazarevic, Srboljub J. Stankovic, Nenad M. Kartalovic, The impact of radiation on the characteristics of the semiconductor monocrystalline germanium, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2016, Vol. 31, No. 1, pp. 97-101, DOI: 10.2298/NTRP1601097O. ISSN:1451-3994 (if:0.620).
- [4] M. Srećković, S. Ostojić, J. Ilić, Z. Fidanovski, S. Jevtić, D. Knežević, and **M. Obrenović**, Photoinduced processes, Radiation Interaction with Material and Damages- Material, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2015, Vol. 30, No. 1, pp. 23-34, DOI: 10.2298/NTRP1501023S. ISSN:1451-3994 (if:0.372).
- [5] Đ. Lazarević, **M. Obrenović**, I. Fetahović, P. Osmokrović, Comparison of obtained empirical variance and the mean values of Normally allocated populations Nuclear counting, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2014, Year 2014, Vol. 29, No. 4, pp. 285-288, DOI: 10.2298/NTRP1404285L. ISSN:1451-3994 (if:0.560).
- [6] D. Nikolić, A. Vasić, D. Lazarević, **M. Obrenović**, Improvement Possibilities of the I-V Characteristics of PIN Photodiodes Damaged by Gamma Irradiation, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2013, Vol. 28, No. 1, pp. 84-91, DOI: 10.2298/NTRP1301084N. ISSN:1451-3994 (if: 1.000).

[7] I. Knežević, N. Zdjelarević, **M. Obrenović**, M. Vujisić, Absorbed Dose assessment in Particle-Beam Irradiated Metal-oxide and Metal-nonmetal memristors, Nuclear Technology & Radiation Protection, 2012, Vol. 27, No.3, pp. 290-296, DOI: 10.2298/NTRP1203290K, ISSN:1451-3994 (if:1.000).

## RADOVI U ZBORNICIMA SA MEĐUNARODNIH NAUČNIH SKUPOVA

### Zbornici međunarodnih naučnih skupova – M30

#### **M33- Saopštenja sa međunarodnih skupova štampanih u celini**

[1] E. Dolićanin, **M. Obrenović**, I. Fetahović, B. Irićanin, K. Stanković, Monte-Carlo Simulation of Radiation Impact on Flash memory Cells, Scientific Publication of the State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Ser.A: Math. Inform. and Mech., Vol 7, 2 (2015), 123-131.

[2] **M. Obrenović**, Đ. Lazarević, S. Stanković, P. Osmokrović, Numerical Simulations of Pulsed Power Electronic Components Radiation Hardness, Proceedings of IEEE 2015 International Pulsed Power Conference(PPC), Austin, TX, 2015, pp. 1-6.DOI: 10.1109/PPC.2015.7296954. ISBN: 978-14799403-9.

[3] S.Stankovic, R.Ilic, D.Lazarevic, I. Fetahovic, **M. Obrenovic**, B.Iricanin, Correlation between MOSFET dosimeter energy respon and its shelding material in electron-beam radiation environment, Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference, 2015, 7296888. ISBN: 978-147998403-9.

## RADOVI U ZBORNICIMA SA SKUPOVA NACIONALNOG ZNAČAJA

### Zbornici međunarodnih naučnih skupova – M60

#### **M63- Saopštenja sa skupova nacionalnog značaja štampanih u celini**

[1] I. Knežević, N. Zdjelarević, **M. Obrenović**, E. Dolićanin, M.Vujisić, Radijacioni efekti u memristorima na bazi titanijum dioksida, 31. Savetovanje CIGRE Srbija 2013, Zlatibor 26.05.-30.05.2013., Zbornik radova, R D1-11, 2013, ISBN 978-86-82317-72-2.

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu navedenog, Komisija smatra da doktorska disertacija kandidata Marije D. Obrenović, master inženjera, pod nazivom: : *"Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala"*, predstavlja značajan originalan naučni doprinos u oblasti Inženjerstva materijala, što je potvrđeno objavljivanjem radova u relevantnim časopisima međunarodnog značaja i saopštenjima na međunarodnim konferencijama. Komisija smatra da je kandidat definisanjem teme, eksperimentalnim pristupom, kao i detaljnim razmatranjima dobijenih rezultata ostvario zadate ciljeve i da doktorska disertacija u potpunosti ispunjava sve zahtevane kriterijume.

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu da prihvati ovaj referat i da ga zajedno sa podnetom disertacijom Marije D. Obrenović, master inženjera pod nazivom: *"Mogućnost primene komercijalnih VDMOS tranzistora snage kao senzora i dozimetara jonizujućeg zračenja izrađenih od elementarnih poluprovodničkih materijala"*, izloži na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku i nakon toga uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, a onda završetkom ove procedure, pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije.

### ČLANOVI KOMISIJE

---

Dr Rajko Šašić, redovni profesor  
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Nenad Kartalović. naučni saradnik,  
Univerziteta u Beogradu, Institut Nikola Tesla

---

Dr Saša Kočinac, redovni profesor  
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet