

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na 733. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, održanoj 14. juna 2011. godine, imenovani smo za članove Komisija za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije Miloša Zdravkovića dipl. ing.-master, pod naslovom "**Uticaj radijacionih oštećenja i povišenja temperature na nivo šuma kod solarnih ćelija**". Nakon uvida u dostavljeni materijal podnosimo Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta sledeći

I Z V E Š T A J

1. Podaci o kandidatu

Miloš Zdravković je rođen 26.08.1976.god. u Beogradu. gde živi i radi. Osnovnu školu i gimnaziju prirodno-matematički smer završio je u Zaječaru. Na Medicinskom i ekološkom inženjeringu Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu diplomirao je 2007. godine. Zvanje magistra tehničkih nauka stekao je 2010. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Student je treće godine doktorskih studija na Nuklearnoj, medicinskoj i ekološkoj tehnici na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Od 2001 bio je vlasnik ICL.Doo Zaječar. Od 2007 bio je administrator na održavanju sistema u odeljenju za održavanje upravljačko informacionih sistema odsek održavanje računarske opreme i mreža , u sektoru za upravljačko-informacione sisteme u saobraćaju u JP "PUTEVI SRBIJE". Od 2008 bio je inženjer na projektovanju u odeljenju za projektnu i plansku dokumentaciju u sektoru za strategiju projektovanje i razvoj u JP "PUTEVI SRBIJE". Od 2010 je inženjer na implementaciji ITS-a u sektoru za strategiju projektovanje i razvoj u JP "PUTEVI SRBIJE". Od 2010 takođe je saradnik "STADIA" venture finance ag, CH-6300 Zug i saradnik "Drago Projekt", Bulevar Arsenija Černojevića Beograd. Govori engleski i italijanski. Oženjen je i otac jedne devojčice.

U svom dosadašnjem radu Miloš Zdravkovića je objavio sledeće radove:

1. **Miloš Zdravković**, Aleksandra Vasić, Radovan Radosavljević, Miloš Vujisić, Predrag Osmokrović, Influence of radiation on the properties of solar cells, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, Vol. 26, No. 2, pp. 105-110, 2011. [ISSN 1451-3994] [IF: 0.706] M23.
2. Aleksandra Vasić, **Miloš Zdravković**, Miloš Vujisić, Koviljka Stanković, Predrag Osmokrović, Temperature Dependence of Solar Cell Characteristics Through Frequency Noise Level and Ideality Factor Measurements, *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, Vol. 42, No. 2, 2012. (accepted for publication) M23.
3. Aleksandra Vasić, Koraljka Kovačević, **Miloš Zdravković**, Edin Določanin, Miloš Vujisić, Električne i optičke karakteristike solarnih ćelija u zavisnosti od temperature, 10. savetovanje BiH CIGRE 2011 (25-29 Septembar), Zbornik radova R.D1.02.
4. Radovan Radosavljević, **Miloš Zdravković**, Bojan Cavrić, Koviljka Stanković, Aleksandra Vasić, Povišenje nivoa šuma kod solarnih ćelija usled povišenja temperature i radijacionih oštećenja, *Elektroprivreda*, Vol. 64, No. 3, pp19-25, 2011. [ISSN 0013-5755]

5. Radovan Radosavljević, **Miloš Zdravković**, Bojan Cavrić, Koviljka Stanković, Aleksandra Vasić, Povišenje nivoa šuma kod solarnih ćelija usled povišenja temperature i radijacionih oštećenja, 30. savetovanje CIGRE Srbija 2011 (31 maj – 5 jun), R D1-02.
6. Aleksandra Vasić, Miloš Vujisić, Koraljka Kovačević-Markov, **Miloš Zdravković**, Edin Dolićanin, Određivanje temperaturske zavisnosti karakteristika solarnih ćelija merenjima frekventnog šuma i faktora idealnosti, 30. savetovanje CIGRE Srbija 2011 (31 maj – 5 jun), R D1-03.

2. Predmet i cilj istraživanja

Jedna od osnovnih karakteristika svih detektora je energetska rezolucija koja u prvenstveno zavisi od šuma. Negativan uticaj šuma na funkcionisanje detektora ogleda se u širenju spektralne linije signala i podizanju praga detekcije, što predstavlja glavni ograničavajući faktor za rad detektora. Iz tog razloga snižavanje nivoa šuma je veoma važan preduslov za dobijanje kvalitetnih detektora te su istraživanja fizičkih osnova različitih tipova šuma neophodna za njihovu optimizaciju. Može se reći da, bez obzira na kvalitet detektora, šum je prisutan u svim detektorima i zavisi od fundamentalnih fizičkih procesa tokom proizvodnje i tokom rada uređaja.

U poluprovodnicima je posebno značajan niskofrekventni električni šum kao što su $1/f$ šum i praskavi šum. Obe vrste šuma se manifestuju kao slučajna fluktuacija struje ili napona na izlazu dovodeći do snižavanja efikasnosti uređaja. Iako još uvek nije teorijski dokazano, mnogi eksperimentalni rezultati ukazuju na to da poreklo $1/f$ šuma i praskavog šuma mogu da budu fluktuacije broja slobodnih nosilaca naelektrisanja povezane sa prisustvom zamki lokalizovanih u blizini ili direktno u oblasti spoja, ili fluktuacije pokretljivosti nosilaca naelektrisanja. U oba slučaja ove fluktuacije proizilaze iz interakcije nosilaca sa defektima, površinskim stanjima i nečistoćama koje su nastale ili tokom procesa proizvodnje uređaja, ili su prisutne kao posledica nepovoljnih uslova rada (zračenje, povišene temperature, vlažnost). To je posebno izraženo u slučajevima kada uređaji imaju veliki odnos površina/zapremina, kao što su solarne ćelije. U tim slučajevima se očekuje da su površinski efekti glavni uzrok pojave niskofrekventnog šuma pa su visoko kvalitetni kontakti od izuzetnog značaja. S obzirom na to da silicidi imaju dobru temperatursku stabilnost i malu otpornost, oni se vrlo često koriste za proizvodnju pouzdanih kontakata. Formiranje silicida je veoma složen proces koji uključuje nanošenje tankih metalnih slojeva na poluprovodnik, odgrevanje i jonsku implantaciju, tako da kvalitet silicida, a samim tim i nivo šuma zavise od mnogo povezanih faktora (temperature, doze implantacije itd.).

Drugi uzrok šuma koji se najčešće povezuje sa otežanim uslovima rada je zračenje. Prilikom interakcije sa metrijalom, zračenje može da deponuje veliku količinu energije koja izaziva različite efekte. Defekti u poluprovodnicima proizvedeni zračenjem su povezani sa lokalizovanim energetski stanjima koja menjaju koncentraciju i pokretljivost nosilaca naelektrisanja. Naime, osnovna karakteristika detektora je širok opseg koncentracija nosilaca naelektrisanja bilo usled postojanja nečistoša i defekata, bilo usled povišene temperature. Lokalizovana energetska stanja u kristalu se najčešće takozvani rekombinacioni centri a nečistoće sa dubokim ili višestrukim energetskim nivoima u znatnoj meri stimulišu process rekombinacije. Defekti izazvani zračenjem ispunjavaju ove uslove i mogu da predstavljaju rekombinacione centre. Glavni efekat koji zračenje izaziva je povećanje struje zasićenja generisane unutar ili na površini osiromašene oblasti. Trajna oštećenja uređaja su prozrokovana sudarima upadnog zračenja sa atomima kristalne rešetke, što može da dovede do njihovog izmeštanja i stvaranja defekata. Generaciono-rekombinacioni šum može da bude prozveden fluktuacijama gustine nosilaca naelektrisanja proizvedene spontanim fluktuacijama generacije i rekombinacije nosilaca naelektrisanja. Iz tih razloga se sprovode opsežna

istraživanju u cilju razvijanja poluprovodničkih uređaja koji mogu pouzdano da rade u uslovima povećanog zračenja. Sa tehnološkog stanovišta je veoma vazno da se utvrde promene izlaznih karakteristika uređaja (struje, napona i efikasnosti) usled izloženosti zračenju koje mogu da utiču na njegov rad.

Cilj disertacije je da istraži povišenje nivoa šuma kod solarnih ćelija usled povišenja temperature i radijacionih oštećenja radi proizvodnje pouzdanih i kvalitetnih uređaja.

3. Polazne hipoteze

Pretpostavlja se da zapreminske dislokacije koje izaziva jonizujuće zračenje u kristalnoj strukturi solarnih ćelija stvaranjem apsorpcionih zamki za slobodne elektrone utiče na niskofrekventni šum ($1/f$ šum) kao i na praskavi šum. Takođe se pretpostavlja da promena temperature koja dovodi do povećane amplitude oscilovanja čvorova kristalne rešetke takođe predstavlja izvor ova dva tipa šuma. Smatra se da postoji funkcionalna zavisnost između niskofrekventnog šuma i doze apsorbiranog zračenja odnosno temperature na kojoj se nalazi solarna ćelija. U cilju provere ovih hipoteza izvršiće se eksperimentalna i analitička istraživanja uticaja doze zračenja i temperature na mikroskopske i makroskopske karakteristike solarnih ćelija. Rezultati ovih analiza daće osnov za uočavanje pravilnosti i univerzalnih osobina interakcije polja jonizujućeg zračenja i temperaturskog polja sa komponentama za fotonaponsku konverziju. Rezultati doktorske disertacije biće, između ostalog, nastavak već publikovanih rezultata u sledećim referencama:

1. Jayaweera, P. V. V., Pitigala, P. K. D. D. P., Perera, A. G. U., Tennakone, K., $1/f$ Noise and Dye-Sensitized Solar Cells, *Semiconductor Science Technology*, 20 (2005), 8, L40-L42.
2. Jayaweera, P. V. V., Pitigala, P. K. D. D. P., Senevirante, M. K. I., Perera, A. G. U., Tennakone, K., $1/f$ Noise in Dye-Sensitized Solar Cells and NIR Photodetectors, *Infrared Physics & Technology*, 50(2007), 2-3, pp. 270-273.
3. Stojanović, M., Jeynes, C., Bibić, N., Milosavljević, M., Vasić, A., Milošević, Z., Frequency Noise Level of As Ion Implanted TiN-Ti-Si Structures, *Nuclear Instruments and Methods B*, 115 (1996), 4, pp. 554-556.
4. Stojanović, M., Vasić, A., Jeynes, C., Ion Implanted Silicones Studies by Frequency Noise Level Measurements, *Nuclear Instruments and Methods B*, 112(1996), 1-4, pp. 192-195.
5. Vasić, A., Osmokrović, P., Vujisić, M., Dolićanin, Č., Stanković, K., Possibilities of Improvement of Silicon Solar Cell Characteristics by Lowering Noise, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10 (2008), 10, pp. 2800-2804.
6. Holwes-Siedle, A. G., Adams, L., Handbook of Radiation Effects, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, UK, 2002.
7. Alexander, D. R., Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits, *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, 50 (2003), 3, pp. 565-582.
8. Marjanović, N., Vujisić, M., Stanković, K., Despotović, D., Osmokrović, P., Simulated Exposure of Titanium Dioxide Memristors to Ion Beams, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 25 (2010), 2, pp. 120-125.
9. Alurralde, M., Tamasi, M. J. L., Bruno, C. J., Martinez Bogado, M. G., Pla, J., Fernandez Vasquez, J., Duran, J., Shuff, J., Burlon, A. A., Stoliar, P., Kreiner, A. J., Experimental and Theoretical Radiation Damage Studies on Crystalline Silicon Solar Cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82 (2004), 4, pp. 531-542.
10. Khan, M., Yamaguchi, Y., Ohshita, N., Dharmaraso, N., Araki, K., Khanh, V. T., Itoh, H., Ohshima, T., Imaizumi, M., Matsuda, S., Strategies for Improving [10] Radiation Tolerance of Si Space Solar Cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 75 (2003), 1-2, pp. 271-276.

11. Vujisić, M., Stanković, K., Dolićanin, E., Osmokrović, P., Radiation Hard ness of COTS EPROMs and EEPROMs, *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Tecnology*, 165 (2010), 5, pp. 362-369.
12. Vujisić, M., Stanković, K., Dolićanin, E., Jovanović, B., Radiation Ef fects in Polycarbonate Capacitors, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 24 (2009), 3, pp. 209-211.
13. Osmokrović, P., Jurošević, M., Stanković, K., Vujisić, M., Ra di a tion Hard ness of Gas Dis charge Tubes and Av a lanche Di odes Used for Tran sient Volt age Sup pres - sion, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 164(2009), 12, pp. 800-808.
14. Vasić, A., Stojanović, M., Osmokrović, P., Stojanović, N., The In flu ence of the Ideality Fac tor on Fill Fac tor and Ef fi ciency of So lar Cells, *Materi als Science Fo - rum*, 352 (2000), pp. 241-246.
15. Stanković, K., Vujisić, M., Delić, Lj., In flu ence of Tube Vol ume on Mea sure ment Un cer tainty of GM Coun ters, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 25 (2010), 1, pp. 46-50.
16. Vujisić, M., Stanković, K., Osmokrović, P., A Sta tis ti - cal Anal y sis of Mea sure ment Re sults Ob tained from Non lin ear Phys i cal Laws, *Ap plied Math e mat i cal Mod el ing*, 35 (2011), 7, pp. 3128-3135.

4. Naučne metode istraživanja

Biće proučavane temperaturske zavisnosti $1/f$ šuma u silicidima i biće obavljeno za TiN/Ti/Si uzorke. Za sve uzorke biće urađena jonska implantacija As^+ jonima, odgrevanje i karakterizacija električnih osobina. Doze implantacije će se kretati od 5×10^{15} jona/cm² do 1×10^{16} jona/cm². Uzorci će biti izlagani termičkom tretmanu na različitim temperaturama u trajanju od 20 min. Za razliku od drugih merenja sličnog tipa, ova merenja će biti bazirana na temperaturskoj zavosnosti nivoa šuma u silicidima na dve temperature: 21°C i 50°C. Nivo šuma će biti meren standardnom ORTEC opremom (za automatsku kalibraciju će biti korišćen MAESTRO II kod). Eksperimentalna merenja promena izlaznih karakteristika solarnih ćelija biće vršena na komercijalno dostupnim solarnim ćelijama baziranim na enkapsuliranom polikristalnom silicijumu. Strujno-naponska merenja biće korišćena za karakterizaciju izlaznih veličina solarnih ćelija. Koristiće se standardna merna oprema za merenje $I-V$ krive za različite nivoe osvetljenja (između 40 i 350 W/m²). Solarne ćelije biće ozračivane Co-60 gama izvorom različitih doza. Ozračivanje će biti izvršeno kroz staklo u kontrolisanim uslovima. Pre i posle svakog koraka ozračivanja biće merene strujno-naponske karakteristike u strogo kontrolisanim uslovima na sobnoj temperaturi. Za sva merenja, kombinovana merna nesigurnost će biti manja od 5%. Dobijeni eksperimentalni rezultati će biti intepretirani na osnovu teorije interakcije zračenja sa kristalnim materijalima kao i teorije praskavog i $1/f$ šuma.

5. Očekivani naučni doprinos

Sve šira primena solarne energije kao jednog od glavnih alternativnih izvora za dobijanje električne energije, posledica je relativno niske cene solarnih uređaja, kao i činjenice da predstavljaju ekološki najprihvatljiviji izvor energije ne ugrožavajući ni u kom pogledu životnu sredinu. Velika pažnja u istraživanjima posvećena je unapređenju tehnologije izrade fotonaponskih ćelija kako bi se povećala njihova efikasnost i smanjila cena proizvodnje. Međutim, solarne ćelije, kao efikasan i pouzdan izvor energije, često rade u uslovima u kojima ne postoji mogućnost redovnog servisiranja i zamene delova, dok su one same izložene vrlo nepovoljnim uticajima okoline, ako što je na primer zračenje. Budući da se solarne ćelije vrlo često koriste u uslovima povećane radioaktivnosti (visoki, nepristupačni

planinski predeli, vazduhoplovna i svemirska tehnologija i sl.), to je problem njihove radijacione otpornosti veoma aktuelan. Iz tog razloga, stabilnost i dugovečnost karakteristika solarnih ćelija predstavlja osnovni zahtev njihovih korisnika. Naučni doprinos ovog rada je dobijanje pouzdanih podataka o stabilnosti osobina solarnih ćelija tokom eksploatacije u uslovima dejstva radioaktivnog zračenja (dinamička radijaciona otpornost), kao i stepen ireverzibilnih promena karakteristika ćelije, akumuliranih dejstvom radioaktivnog zračenja (statička radijaciona otpornost).

S druge strane, s obzirom na to da svi dinamički procesi u poluprovodničkim uređajima zavise od temperature, proučavanje promena parametara spoja (faktora idealnosti, struje zasićenja itd.) usled povišenja temperature je od velikog značaja. Određivanje dominantnog strujnog mehanizma je veoma teško zato što relativne vrednosti ovih komponenti zavise od različitih parametara, kao što su gustina međupovršinskih stanja, koncentracija nečistoća i defekata, visina potencijalne barijere, napon uređaja i njegova temperature. Vrednosti faktora idealnosti za različite temperature može da ukaže ne samo na transportni mehanizam, već indirektno i na prisustvo i moguću aktivaciju defekata i nečistoća koje se ponašaju kao rekombinacioni centri. Takođe, prisustvo defekata u materijalu se smatra osnovnim uzrokom postojanja strujnog šuma. Neki tipovi šuma kod fotodetektora su povezani sa prisustvom prekomerne struje, povezujući optičke i električne karakteristike takvih uređaja. Osnovni doprinos ovog rada je da prikaže temperatursku zavisnost osnovnih karakteristika solarnih ćelija koristeći temperatursku zavisnost $1/f$ šuma u silicidima i faktora idealnosti kod fotodioda, što bi omogućilo njihov dalji razvoj i širu primenu u različitim uslovima rada.

6. Plan istraživanja i struktura rada

Osnova ovog rada predstavljaju eksperimentalna merenja i iscrpna analiza dobijenih rezultata u cilju dobijanja odgovarajućeg naučnog i praktičnog doprinosa razvoju fotonaponske (PV) konverzije sunčeve energije. S obzirom na usku povezanost šuma kao neminovnog pratioca u nepovoljnim uslovima rada (povećana radijacija i/ili povišena temperatura) s jedne strane i solarne ćelije kao vrste foto detektora, planirana je uporedna analiza niskofrekventnog šuma kod silicida, kao najčešće korišćenog materijala za izradu kontakata, kao i radijacionih oštećenja kod solarnih ćelija, nastalih izlaganjem različitim vrstama i dozama zračenja.

Struktura rada se bazira na uvodnom delu u kome će ukratko biti navedene komparativne prednosti korišćenja solarne energije kao alternativnog izvora energije i glavni pravci daljeg razvoja PV tehnologije koji se sprovode u cilju smanjenja šuma, kao glavnog ograničavajućeg parametra u radu bilo koje vrste detektora. U teorijskom delu biće razmatrana radijaciona oštećenja nastala u poluprovodničkim materijalima i strukturama usled njihove izloženosti različitim vrstama zračenja. Pored toga, biće analizirana i veza između datih oštećenja i nivoa šuma, posebno niskofrekventnog $1/f$ šuma. S obzirom na veoma važan aspekt temperaturske stabilnosti u radu solarnih ćelija, biće analizirana i zavisnost osnovnih izlaznih parametara solarnih ćelija od povišene temperature. Praktičan deo rada će se odnositi na merenja $1/f$ šuma kod silicida, kao i određivanje zavisnosti osnovnih parametara solarnih ćelija od doza različitih vrsta zračenja. Biće data i kratka analiza temperaturske zavisnosti nekih izlaznih parametara solarnih ćelija. Glavni naučni doprinos rada biće detaljno izložen u analizi rezultata merenja, a kratak pregled najvažnijih rezultata biće dat u zaključku.

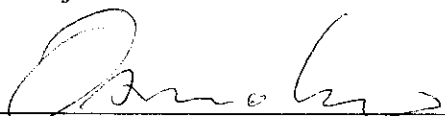
7. Zaključak i predlog

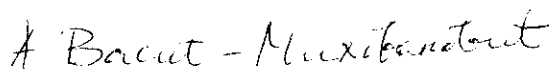
Mr Miloš Zdravković, diplomirani inženjer elektrotehnike, prijavio je svoju doktorsku disertaciju pod naslovom **"Uticaj radijacionih oštećenja i povišenja temperature na nivo šuma kod solarnih ćelija"** u skladu sa Pravilnikom o doktorskim studijama Elektrotehničkog

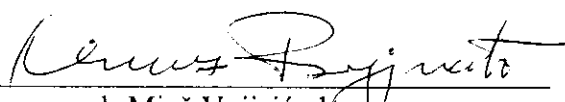
fakulteta Univerziteta u Beogradu, podnevši na uvid sva, pomenutin pravilnikom, predviđena dokumenta. Na osnovu podnesenih dokumenata konstatovano je da je Miloš Zdravković diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Magistrirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Ne postoje nikakve zakonske smetnje da prijavi doktorsku disertaciju. Kandidat ima radove koji su predstavljeni na domaćim i međunarodnim stručnim konferencijama, kao i niz publikacija u nacionalnim okvirima. Iz dostavljene dokumentacije, koja uključuje i bibliografiju do sada objavljenih naučnih i stručnih radova Miloša Zdravkovića, može se zaključiti da se radi o uspešnom mladom naučnom radniku od kojeg se očekuje da će ciljeve postavljene u prijavi svoje disertacije uspešno realizovati u roku koji je predviđen zakonom. Na osnovu obrazloženja predmeta i cilja istraživanja, polaznih hipoteza istraživanja, očekivanih naučnih doprinosa i plana istraživanja, može da se zaključi da tema prijavljene doktorske disertacije pod naslovom **"Uticaj radijacionih oštećenja i povišenja temperature na nivo šuma kod solarnih ćelija"** omogućava da se u okviru nje ostvare značajni naučni i stručni doprinosi iz oblasti pražnjenja u gasovima. Predloženi mentor, prof. dr Predrag Osmokrović, ima veliki broj naučnih radova iz oblasti kojoj pripada prijavljena doktorska disertacija kandidata mr Miloša Zdravkovića, te u tom smislu smatramo da je kompetentan da obavlja funkciju mentora ove disertacije. Stoga predlažemo Nastavno-naučnom veću da odobri izradu doktorske disertacije kandidata Miloša Zdravkovića pod naslovom **"Uticaj radijacionih oštećenja i povišenja temperature na nivo šuma kod solarnih ćelija"**, pod mentorstvom prof. dr Predraga Osmokrovića.

U Beogradu, 9.1.2012.god.

Komisija


dr Predrag Osmokrović, red. prof.
Elektrotehnički fakultet u Beogradu


dr Aleksandra Vasić Milovanović, van. prof.
Mašinski fakultet u Beogradu


dr Mioš Vujisić, doc.
Elektrotehnički fakultet u Beogradu