

Povišenje nivoa šuma kod solarnih ćelija usled povišenja temperature i radijacionih oštećenja

Radovan Lj. Radosavljević¹,

Miloš R. Zdravković¹, Bojan B. Cavrić¹, Koviljka Đ. Stanković¹ i Aleksandra I. Vasić²

¹Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11 000 Beograd, Srbija

²Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11 000 Beograd, Srbija

Stručni rad

UDK: 621.385.51; 523.9; 612.014.44

Rezime

Rad u otežanim uslovima kao što su povišena temperatura i zračenje mogu značajno pogoršati osnovne karakteristike fotodetektora (na primer, solarnih ćelija). Iako mehanizmi i procesi degradacije mogu biti različiti, svi oni, manje ili više, povećavaju nivo šuma u uređaju i povećavaju prag detekcije i ograničavaju funkcionisanje uređaja. To je veoma izraženo kod solarnih ćelija, zbog njihovog specifičnog dizajna i stalne izloženosti sunčevom zračenju. U ovom radu istraživanja su usmerena na analizu uticaja povišene temperature i radijacionih oštećenja na nivo šuma u solarnim ćelijama.

Ključne reči: nivo šuma, solarne ćelije, radijaciona oštećenja

INCREASED NOISE LEVEL IN SOLAR CELLS CAUSED BY THE INCREASED TEMPERATURE AND RADIATION DAMAGE

Abstract

Difficult working conditions such as increased temperature and radiation could significantly deteriorate main characteristics of photo-detectors (e.g. solar cells). Though degradation mechanisms and processes could be various, they all, more or less, increase the noise level in the device, thus resulting in the rise of the detection threshold, and limitation of device functioning. This is particularly prominent in the case of solar cells, because of their specific design, and constant exposure to solar irradiation. Investigations in this paper are directed to analyzing the influence of the increased temperature and radiation damage on noise level in solar cells.

Key words: noise level, solar cells, radiation damage

1. UVOD

Jedna od osnovnih karakteristika svih detektora je energetska rezolucija koja 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 [1]. Zbog to-

ga je snižavanje nivoa šuma veoma važan preduslov za dobijanje kvalitetnih detektora, te su istraživanja fizičkih osnova različitih tipova šuma neophodna za njihovu optimizaciju. Bez obzira na kvalitet detektora, šum postoji u svim detektorima i zavisi od fundamentalnih fizičkih procesa tokom proizvodnje i tokom rada uređaja.

U poluprovodnicima je naročito 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 i snižavaju efikasnost uređaja. Iako još 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 zamkama lokalizovanim u blizini ili direktno u oblasti spoja, ili fluktuacije pokretljivosti nosilaca naelektrisanja [2–4]. U oba slučaja ove fluktuacije proizilaze iz interakcije nosilaca sa defektima, površinskim stanjima i nečistoćama nastalim ili tokom procesa proizvodnje uređaja, ili usled nepovoljnih uslova rada (zračenje, povišene temperature, vlažnost) [5]. To je naročito izraženo 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 visokokvalitetni kontakti od izuzetnog značaja. S obzirom na to da silicidi imaju dobru temperaturnu stabilnost i malu otpornost, oni se vrlo često koriste za proizvodnju pouzdanih kontakata. Formiranje silicida je veoma složen proces jer 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 s otežanim uslovima rada je zračenje. Prilikom interakcije sa materijalom, zračenje može da deponuje veliku količinu energije koja izaziva različite efekte [6]. Defekti u poluprovodnicima proizvedeni zračenjem povezani su sa lokalizovanim energetskim stanjima [7–9] 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 najčešće su takozvani rekombinacioni centri a nečistoće sa dubokim ili višestrukim energetskim nivoima u znatnoj meri stimulišu proces rekombinacije. Defekti izazvani zračenjem ispunjavaju ove uslove i mogu da predstavljaju rekombinacione centre. Glavni efekat koji zračenje izaziva je povećanje struje zasićenja generisane unutar površine osiromašene oblasti ili na njoj. Trajna oštećenja uređaja su pouzrokovana sudarima upadnog zračenja s atomima kristalne rešetke, što može da dovede do njihovog izmeštanja i stvaranja defekata [10, 11]. Generaciono-rekombinacioni šum može da bude prozveden fluktuacijama gustine nosilaca naelektrisanja proizvedene spontanom fluktuacijama generacije i rekombinacije nosi-

laca naelektrisanja. Iz tih razloga se sprovode opsežna istraživanja radi razvijanja poluprovodničkih uređaja koji mogu pouzdano da rade u uslovima povećanog zračenja [12–14]. Sa tehnološkog stanovišta je veoma važno da se utvrde promene izlaznih karakteristika uređaja (struje, napona i efikasnosti) usled izloženosti zračenju koje mogu da utiču na njegov rad.

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

2. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Proučavanje temperaturske zavisnosti 1/f šuma u silicidima obavljeno je za TiN/Ti/Si uzorke. Za sve uzorke je urađena jonska implantacija As⁺ jonima, odgrevanje i karakterizacija električnih osobina. Doze implantacije su se kretale od 5 x 1 015 jona/cm² do 1 x 1 016 jona/cm². Uzorci su izlagani termičkom tretmanu na različitim temperaturama 20 minuta. Za razliku od drugih merenja sličnog tipa, ova merenja su bila bazirana na temperaturnoj zavisnosti nivoa šuma u silicidima na dve temperature: 21 °C i 50 °C. Nivo šuma je meren standardnom ORTEC opremom (za automatsku kalibraciju je korišćen MAESTRO II kod).

Eksperimentalna merenja promena izlaznih karakteristika solarnih ćelija su vršena na komercijalno dostupnim solarnim ćelijama baziranim na enkapsuliranom polikristalnom silicijumu. Strujno-naponska merenja su korišćena za karakterizaciju izlaznih veličina solarnih ćelija. Korišćena je standardna merna oprema za merenje I-V krive za različite nivo osvetljenja (između 40 i 350 W/m²).

Solarne ćelije su ozračivane Co-60 gama izvorom različitih doza. Ozračivanje je izvršeno kroz staklo u kontrolisanim uslovima. Pre i posle svakog koraka ozračivanja merene su strujno-naponske karakteristike u strogo kontrolisanim uslovima na sobnoj temperaturi. Za sva merenja, kombinovana merna nesigurnost je bila manja od 5 %.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

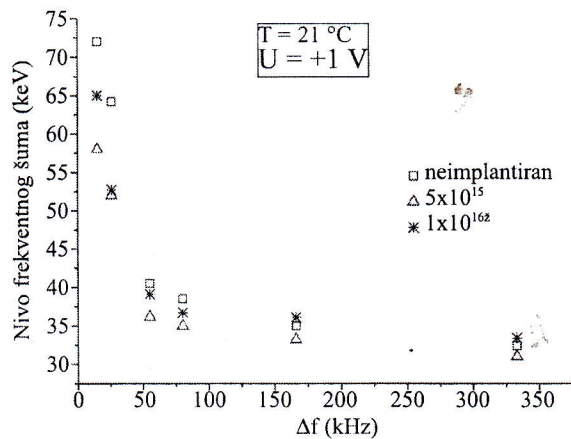
3.1. Merenja nivoa šuma u silicidima

Iako je očekivano da je u uslovima povišene temperature termički šum dominantan u celokupnom šumu u poluprovodničkim uređajima, u ovom radu je primećeno povećanje i 1/f šuma. Spektri frekventno zavisnog šuma na nižoj (21 °C) i višoj (50 °C) temperature prikazani su na slikama 1 i 2, respektivno. Iako se smatra da su stabilni i pouzda-

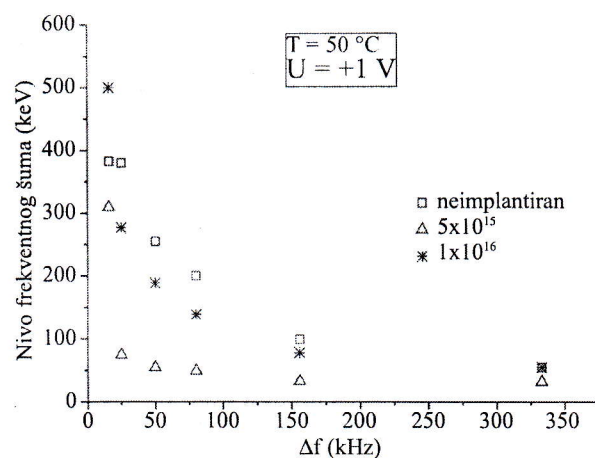
ni kao kontakti, defekti i nečistoće u osnovnom materijalu silicida mogu tokom vremena da proizvedu neke negativne efekte.

To je naročito izraženo ako se ta stanja nalaze unutar energetskog procepa i aktiviraju se tokom rada u nepovoljnim uslovima kao što je povišena temperatura. U tom slučaju ona postaju zamke za parove elektron–šupljina i na taj način smanjuju broj kolektovanih nosilaca naelektrisanja, proizvodeći šum u uređaju.

Međutim, primećeno povećanje $1/f$ šuma može da se, u izvesnoj meri, stabilizuje kontrolisanom jonskom implantacijom, kao što se može videti na slikama 1 i 2. Strukturalna RBS analiza je pokazala da jonska implantacija ne izaziva redistribuciju komponenta kada su posredi niže doze implantacije, ali je za više doze implantacije (1×10^{16} jona/cm²) primećena razrušena struktura, a takođe i viši nivo šuma.



Slika 1. Nivo frekventnog šuma za dva implantirana i jedan neimplantiran uzorak na 21 °C



Slika 2. Nivo frekventnog šuma za dva implantirana i jedan neimplantiran uzorak na 50 °C

Ova temperaturno zavisna merenja ukazuju na veoma značajnu činjenicu da jonska implantacija može da obezbedi temperaturnu stabilnost silicida kada je posredi $1/f$ šum. Naime, sa slika 1 i 2 može da se vidi da uzorci implantirani dozama od 5×10^{15} jona/cm² imaju najniži nivo šuma i veoma dobru temperaturnu stabilnost, pa se može reći da ova doza implantacije dovodi do homogenije silicidacije i stvaranja Ti-Si faze sa najnižom koncentracijom kristalnih defekata (posle odgrevanja). Takođe, raniji rezultati su pokazali [4] da je nivo šuma najniži za uzorke implantirane posle odgrevanja. To ukazuje na činjenicu da termička obrada dovodi do relaksacije kristalne rešetke i poboljšanja kristalne strukture silicida, kao i poboljšanja električnih karakteristika uređaja baziranih na silicidima kao kontaktima (na primer solarnim ćelijama).

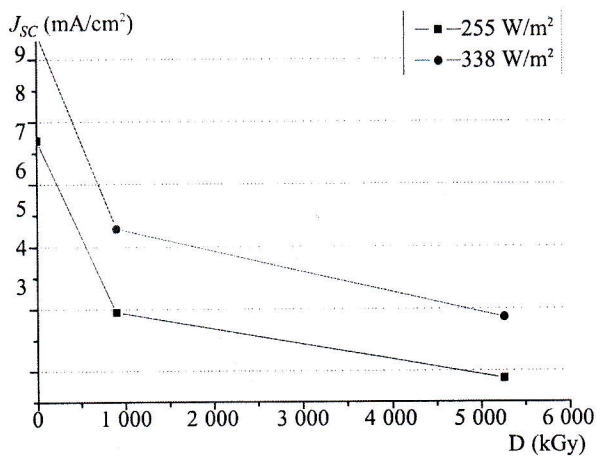
3.2. Šum u solarnim ćelijama proizveden zračenjem

Kao što je moglo i da se očekuje, zračenje ima veliki uticaj na izlazne karakteristike solarnih ćelija (struju, napon, efikasnost). Poznato je da se, u zavisnosti od energije gama zračenja, njegova interakcija sa materijalom svodi na jonizaciju kroz fotoefekat i Komptonov efekat. Takođe, usled neizbežnog prisustva površinskih energetskih stanja (kao rezultat defekata rešetke, dislokacija, nečistoća i sl.), brzina površinske rekombinacije i gustina površinskih stranja rastu posle izlaganja silicijuma zračenju. Ova stanja mogu da predstavljaju veoma efikasne rekombinacione centre za nosioce naelektrisanja. Generacija parova elektron–šupljina usled jonizacionih efekata obično povećava šum i smanjuje izlaznu struju, kao što može da se vidi sa slike 3. Ovo smanjenje je izraženo bez obzira na nivo osvetljenja iako je pad strmiji za niže doze zračenja.

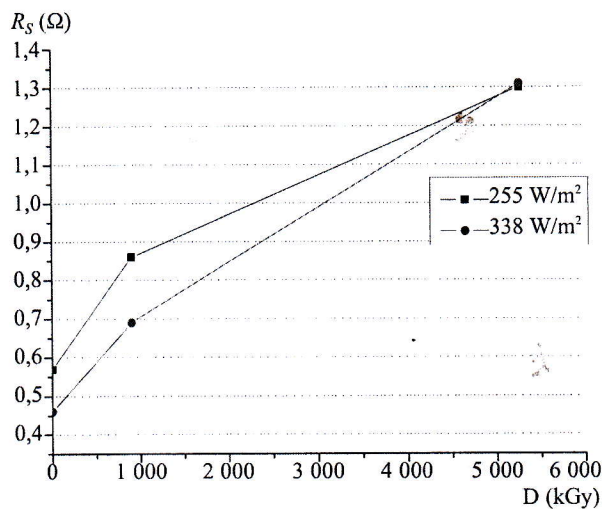
Postojanje promena u materijalu izazvanih zračenjem potvrđeno je merenjima redne otpornosti solarnih ćelija (slika 4).

Nagli rast redne otpornosti primećen je za obe doze, ali je za višu dozu zračenja redna otpornost imala istu vrednost za oba nivoa osvetljenja, što ukazuje da je za više doze zračenja uticaj zračenja dominantan u odnosu na uticaj osvetljavanja. Ovaj porast redne otpornosti negativno utiče na ostale izlazne karakteristike solarnih ćelija, prvenstveno na faktor ispunje i konačno na efikasnost. Na slici 5 prikazan je taj uticaj, gde je uočljiv pad efikasnosti.

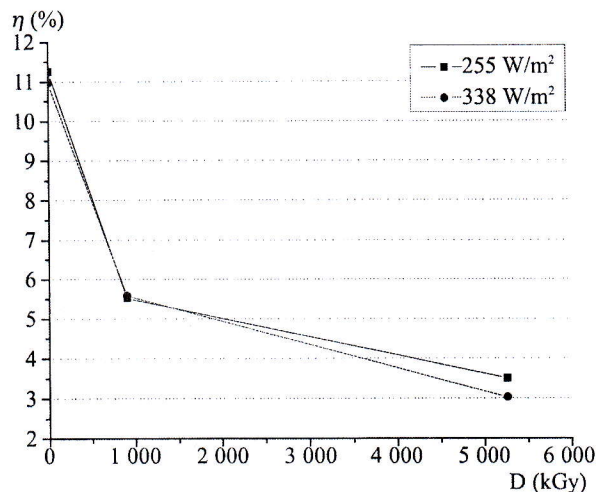
Što se zavisnosti J_{sc} tiče, opadanje je strmije za prvu dozu zračenja, što ukazuje da najveće razrušenje strukture i transportnih mehanizama koji dovode do povišenja šuma nastaje na početku. Takođe, kao što na slici 5 može da se vidi, opadanje efikasnosti



Slika 3. Zavisnost gustine izlazne struje J_{sc} od doze zračenja za dva nivoa osvetljenja



Slika 4. Zavisnost redne otpornosti od doze gama zračenja za dva nivoa osvetljenja



Slika 5. Zavisnost efikasnosti od doze gama zračenja za dva nivoa osvetljenja

ne zavisi od nivoa osvetljenja. Vrednosti efikasnosti su manje-više iste za oba nivoa osvetljenja, što ukazuje da zračenje više utiče na proizvodnju i transport nosilaca naelektrisanja nego osvetljenje. Sa stanovišta principa rada solarne ćelije to može da bude važan ograničavajući faktor.

Može se reći da zajednički uticaj povišenja $1/f$ i praskavog šuma usled oštećenja izazvanog zračenjem ima negativan uticaj na glavnu karakteristiku solarnih ćelija, efikasnost.

4. ZAKLJUČAK

S obzirom na činjenicu da je degradacija električnih i optičkih karakteristika pri povišenoj temperaturi jedan od glavnih ograničavajućih faktora za rad solarnih ćelija, merenja i sniženje nivoa šuma je veoma značajno za poboljšanje karakteristika solarnih ćelija. Temperaturna zavisnost $1/f$ šuma u kontaktnim slojevima pokazala je da, iako je termički šum dominantan na višim temperaturama, postoji i značajno povišenje $1/f$ šuma. Utvrđeno je da doza implantacije ima uticaj i na fizičke i na električne osobine korišćenih silicida. S druge strane, povećanje redne otpornosti usled izlaganja gama zračenju je takođe potvrdilo da oštećenja izazvana zračenjem povećavaju nivo šuma u poluprovodničkim uređajima. Fluktuacije struje i napona i njihovo smanjenje posledica su uticaja zračenja na generaciju i transport nosilaca naelektrisanja. Sve to neizbežno dovodi do smanjenja rezolucije fotodetektora, snižavajući efikasnost solarnih ćelija, pa se karakteristike uređaja moraju kontinualno pratiti, naročito ukoliko su solarne ćelije izložene nepovoljnim uslovima rada.

5. LITERATURA

- [1] C. F. G. Delaney, E. C. Finch, RADIATION DETECTORS PHYSICAL PRINCIPLES AND APPLICATIONS, Oxford Univ. Press, New York, 1992.
- [2] P. V. V. Jayaweera, P. K. D. D. P. Pitigala, A. G. U. Perera, K. Tennakone, $1/f$ NOISE AND DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS, Semiconductor Science Technology 20 (2005) L40-L42.
- [3] P. V. V. Jayaweera, P. K. D. D. P. Pitigala, M. K. I. Senevirante, A. G. U. Perera, K. Tennakone, $1/f$ NOISE IN DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS AND NIR PHOTON DETECTORS, Infrared Physics & Technology 50 (2007) 270–273.
- [4] M. Stojanović, A. Vasić, C. Jeynes, ION IMPLANTED SILICIDES STUDIES BY FREQUENCY NOISE LEVEL MEASUREMENTS, NIM B 112 (1996) 192–195.

- [5] J. L. Barth, C. S. Dyer, E. G. Stassinopoulos, SPACE, ATMOSPHERIC, AND TERRESTRIAL RADIATION ENVIRONMENTS, IEEE Trans. Nucl. Sci. 50 (2003)466–482.
- [6] S. Stanković, R. Ilić, P. Osmokrović, B. Lončar, A. Vasić, COMPUTER SIMULATION OF GAMMA IRRADIATION ENERGY DEPOSITION IN MOSFET DOSIMETERS, IEEE Trans. Plasma Sci. 34 (2006) 1715–1718.
- [7] G. Holmes-Siedle, L. Adams, HANDBOOK OF RADIATION EFFECTS, 2nd Ed., Oxford University Press, 2002.
- [8] K. F. Galloway, HIGH-IMPACT PAPERS PRESENTED AT THE IEEE NUCLEAR AND SPACE RADIATION EFFECTS CONFERENCE: THE VIEW IN 2003, IEEE Trans. Nucl. Sci. 50 (2003) 457–465.
- [9] D. R. Alexander, TRANSIENT IONIZING RADIATION EFFECTS IN DEVICES AND CIRCUITS, IEEE Trans. Nucl. Sci. 50 (2003) 565–582.
- [10] T. Takagi, J. Noda, GAMMA-RAY IRRADIATION EFFECTS IN LIGHT-EMITTING DIODE AND PHOTODIODES FOR FIBER OPTICS, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32 (1985) 4453–4459.
- [11] E. Barnes, THE EFFECTS OF RADIATION ON OPTOELECTRONIC DEVICES, in Proc. SPIE Fiber Optics in Adverse Enviroments, vol. 721 (1986) 18–25.
- [12] N. Horiushi, T. Nozaki, A. Chiba, IMPROVEMENT IN ELECTRICAL PERFORMANCE OF RADIATION-DAMAGED SILICON SOLAR CELLS BY ANNEALING, NIM A 443 (2000) 186–193.
- [13] M. Alurralde, M. J. L. Tamasi, C. J. Bruno, M. G. Martinez Bogado, J. Pla, J. Fernandez Vasquez, J. Duran, J. Shuff, A. A. Burlon, P. Stoliar, A. J. Kreiner, EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RADIATION DAMAGE STUDIES ON CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS, Solar Energy Materials & Solar Cells 82 (2004) 531–542.
- [14] Khan, M. Yamaguchi, Y. Ohshita, N. Dharmaraso, K. Araki, V. T. Khanh, H. Itoh, T. Ohshima, M. Imazumi, S. Matsuda, STRATEGIES FOR IMPROVING RADIATION TOLERANCE OF Si SPACE SOLAR CELLS, Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 271–276.

ZAHVALNICA

Rad je urađen pod pokroviteljstvom Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta 171007.

Dorađeni rad STK D1–02 30. savetovanje CIGRE Srbija je primljen u uredništvo 20. 06. 2011. godine
Rad odobrilo uredništvo 07. 06. 2011. godine



Radovan Lj. Radosavljević rođen je 1949. u Kraljevu. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1972, 1987. i 1994. godine, respektivno. Zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu u zvanju vanrednog profesora.



Miloš R. Zdravković rođen je 1976. godine u Beogradu. Osnovne i diplomske akademske studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2007. i 2010. godine, respektivno. Trenutno je student doktorskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu i zaposlen je u JP Putevi Srbije.



Bojan B. Cavrić rođen je 1985. godine u Beogradu. Osnovne studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2010. godine. Trenutno je student diplomskih akademskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.



Koviljka Đ. Stanković rođena je 1979. godine u Zemunu. Osnovne i diplomske akademske studije završila je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2007. i 2008. godine, respektivno. Asistent je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.



Aleksandra I. Vasić rođena je 1966. godine u Beogradu. Diplomirala je, magistrirala i doktorirala na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1991, 1999. i 2002. godine, respektivno. Zaposlena je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u zvanju vanrednog profesora.