

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike

Odlukom br. 35/126 na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta održanoj 13.05. 2021. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije kandidata **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike:

**„Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“**

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 Ljubinko B. Timotijević, diplomirani inženjer elektrotehnike upisao 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.

24.12..2021. 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, **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike: za izradu doktorske disertacije pod nazivom: „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“ (Odluka br.35/388 ).

08. 04. 2021. godine – Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu doneta je Odluka br. **35/51** o prihvatanju Referata Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata u kojoj se odobrava izrade doktorske disertacije, Ljubinka B. Timotijevića, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod nazivom: „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u

integrisanoj tehnologiji“. Za mentora ove doktorske disertacije određen je prof. dr Aco Janićijević, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a za komentora dr Nenad Kartalović, naučni saradnik Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Univerziteta u Beogradu.

28. 04. 2021. godine – Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost (Odluka 02 br. 61206-1772/2-21) na predlog teme doktorske disertacije, **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod nazivom „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“ na osnovu zahteva Tehnološko-metalurškog fakulteta, broj 35/511 od 19. 05. 2021. Godine.

13.05.2021. godine na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju Komisije za ocenu doktorske disertacije, **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod nazivom „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“, (Odluka br. 35/126 ).

## **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. Mentori kandidata za izradu i odbranu doktorske disertacije su: dr Aco Janićijević, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu koji je do sada publikovao 7 radova M21 (3 M21a i 4 M21), 3 rada M22 i 10 radova M23, 10 radova u vodećim časopisima nacionalnog značaja M51 štampana u celini i 7 radova M52 objavljena u časopisima nacionalnog značaja i dr Nenad Kartalović, naučni saradnik Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Univerziteta u Beogradu, koji je publikovao 4 rada M21, 2 rada M22 i 11 radova 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**

Ljubinko Timotijević je rođen u Beogradu 12.02.1971. godine. U Beogradu je završio osnovnu školu „Vojvoda Mišić“ kao nosilac diplome „Vuk Stefanović – Karadžić“. Tokom školovanja se istakao na brojnim takmičenjima iz velikog broja predmeta a najvidljiviji su bili rezultati sa učešća u takmičenja od razrednih do najviših republičkih takmičenja iz matematike i fizike. Kao sumarni rezultat uspeha u školskim i vanškolskim aktivnostima u svojoj školi je i ostvario je status đaka generacije.

Nakon osmogodišnjeg školovanja (kao logičan sled navedenih rezultata), ostavrio je svoju želju upisivanjem „Matematičke gimnazije – Veljko Vlahović“ u Beogradu koja profiliše kasnije njegovo akademsko obrazovanje, a presudno usmerava i njegovu profesionalnu karijeru,. Prestižnu srednjoškolsku ustanovu u državi i regionu Ljubinko je završio sa odličnim uspehom, a tokom četvorogodišnjeg školovanja je ostvario brojne nagrade iz fizike i matematike na opštinskim, gradskim i republičkim takmičenjima.

Fakultetsko obrazovanje i stručno usavršavanje je ostvario upisom na Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu. Nakon uspešnog okončanja studija elektrotehničkog fakulteta diplomirao 2004. godine na Energetskom odseku, smer za energetske pretvarače. Odbranio je uspešno diplomski rad (ocena 10) - sa temom „Modelovanje prelazne pojave u procesu polaska asinhronog motora“.

Doktorske studije upisao je školske 2010/11. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na Modulu za nuklearnu, medicinsku i ekološku tehniku, gde je završio sve zadatke predviđene planom i programom doktorskih studija i u periodu realizacije navedenih studija položio je sve predmete sa prosečnom ocenom 10 (deset).

Godine 2017/18. upisao je i doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na odseku Inženjerstvo materijala, gde je uspešno položio sve ispite propisane studijskim

programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 9,67, nakon čega prijavljuje temu doktorske disertacije pod nazivom "Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji".

Govori i piše engleski i nemački jezik.

#### 1.3.1 Stečeno naučnoistraživačko iskustvo

Profesionalno angažovanje:

U periodu doktorskih akademskih studija, kandidat je položio sve predmete (ukupno 13) predviđene planom i programom doktorskih studija prosečnom ocenom 9,67 sa ostvarenih 80 ESPB. Kandidat Ljubinko B. Timotijević, diplomirani inženjer elektrotehnike je odbranio Završni ispit pred komisijom u sastavu dr Rajko Šašić, redovni profesor Tmf-a, dr Saša Kočinac, redovni profesor TMF-a i dr Aleksandar Marinković, vanredni profesor TMF-a.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1. Sadržaj disertacije**

Doktorska disertacija kandidata Ljubinka B. Timotijevića napisana je na 125 stranica. Sadrži 41 sliku i 2 tabele. Disertacija je podeljena na 8 poglavlja i na kraju Literatura. Prvo poglavlje je Uvod, drugo je Osobine elektrotehničkih materijala, treće poglavlje je Interakcija zračenja sa materijalom, četvrto je Monte-Carlo metod, peto je Integrisana tehnologija elektronskih kola, šesto je Izolacione metode, sedmo je Radijacioni efekti u izolatorima izrađenim u integrisanoj tehnologiji i osmo poglavlje je Zaključak. Literatura sadrži 108 referenci. Tekst disertacije, slike u disertaciji i tabele u disertaciji su u skladu uputstvom za izradu doktorske disertacije Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

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

U prvom poglavlju rada pod naslovom Uvod kandidat je ukazao na aktuelnost teme koja se istražuje u njegovoj doktorskoj disertaciji. Istakao je da opšti trend minijaturizacije elektronskih komponenata u višeslojnoj tehnologiji sa izuzetno tankim izolacionim slojevima. Radeći u uslovima kontaminacije visokoenergetskog elektromagnetnog zračenja čestica primarnog i sekundarnog kosmičkog zračenja i česticama nuklearnog zračenja može da dođe do oštećenja (razaranja) ovih tankih izolacionih slojeva što obavezno vodi funkcionalnom ili potpunom uništenju posmatrane elektronske komponente. Obzirom na visok stepen zavisnosti funkcionisanja tehnološke i bio sfere od savremene elektronike autor za cilj svoje disertacije postavlja ispitivanje zavisnosti tankih izolacionih slojeva od zračenja. Ovako definisani cilj autor namerava da reši numeričkim eksperimentima i teoretskim postupkom zasnovanim na hipotezama izvedenim iz poznatih rezultata Nuklearne fizike, Interakcije zračenja sa materijalom, Strukturom integrisanih elektronskih kola i Elektrotehničkih materijala. Ovo poglavlje je napisano na jednoj stranici.

U drugom poglavlju pod naslovom Osobine elektrotehničkih materijala, koje je podeljeno na dva potpoglavlja: Energetski procep i Osobine dielektričnih materijala i dielektrični materijali, autor se posvetio osnovama fizičke elektronike čvrstog tela neophodnim za razumevanje i unapređenje teorije efekata interakcije zračenja sa integrisanim elektronskim komponentama. U prvom potpoglavlju dat je prikaz podele materijala na provodne i neprovodne kao i neprovodnih materijala na poluprovodne i izolacione u skladu sa rezultatima kvantne teorije čvrstog tela. U drugom potpoglavlju prikazane su osnovne karakteristike izolacionih materijala: površinska provodnost, unutrašnja provodnost, dielektrična konstanta, tangens ugla gubitaka, probojni napon kao i njihove zavisnosti od uslova primene. Posebna pažnja je posvećena frekventnim zavisnostima realnog i imaginarnog dela relativne dielektrične konstante. Drugo poglavlje ima 20 stranica.

U trećem poglavlju pod nazivom Interakcija zračenja sa materijalom koje je podeljeno na dva potpoglavlja: Interakcija čestičnog (korpuskularnog) zračenja sa materijalom i Interakcija

elektromagnetnog zračenja sa materijalom, je prikazan klasični i kvantno mehanički pristup interakciji korpuskularnog i elektromagnetnog zračenja sa materijom u celini kao njenim konstitutivnim elementima od molekula do nukleona. Osnovna podela tipova interakcija koje su razmatrane zasnivala se na tome da li se radi o česticama sa masom ili fotonima (slobodne čestice bez mase). Čestice sa masom su posebno tretirane u zavisnosti da li imaju ili nemaju Kulonovsko naelektrisanje. Čestice bez mase (elektromagnetno zračenje) je posebno tretirano u zavisnosti da li pripadaju jonizujućem ili nejonizujućem zračenju kao i da li ima kontinualan ili diskretan spektar. Treće poglavlje ima 20 stranica.

Četvrto poglavlje pod naslovom Monte-Carlo metod je podeljeno na 5 potpoglavlja: Slučajni brojevi, Transformacije raspodela slučajnih brojeva, Algoritmi za generisanje slučajnih brojeva, Primene Monte-Carlo simulacija u nuklearnoj fizici i Greška Monte-Carlo simulacija. U potpoglavlju pod naslovom Slučajni brojevi razmatra se generisanje sekvenci slučajnih brojeva predstavlja ključni segment Monte-Carlo metode. Pri tome se naglašava da uspešnost primene ovog metoda umnogome zavisi od kvaliteta upotrebljenih slučajnih brojeva. Pošto postoje tri vrste slučajnih brojeva i pošto se svaka od njih primenjuje tokom rada posvećena im je posebna pažnja. Pri tom se misli na: Pravi slučajni brojevi, Pseudoslučajni brojevi i Kvazi-slučajni brojevi. Potpoglavlje pod naslovom Transformacije raspodela slučajnih brojeva je podeljeno na sledeće celine: Metod inverzne funkcije, Metod odbacivanja, Metod supstitucije i Metod stacionarnih raspodela Markovljevih lanaca. Sve ove celine ukazuju na mogućnost izbora koji se vrši u cilju dobijanja optimalnog algoritma za rešavanje problema preteranog u radu kandidata tj. problema interakcije zračenja sa tankim izolacionim slojem. Četvrto poglavlje ima 38 stranica.

Peto poglavlje pod naslovom Integrisana tehnologija elektronskih kola je dominantno posvećeno tehnološkim postupcima izrade integrisanih kola sa ciljem da se iz tih tehnoloških postupaka izvedu zaključci o eventualnim njihovim nedostacima koja bi mogla biti otklonjena u cilju dobijanja integrisanih kola rezistentih na delovanje svih oblika zračenja posmatrano i diferencijalno i integralno. Peto poglavlje ima 10 stranica.

Šesto poglavlje pod naslovom Izolacione metode daje prikaz karakterističnih postupaka izvođenja izolacije u najčešće korišćenim integrisanim kolima da bi se mogao postupak specifičan za ta integrisana kola posmatrati kao parameta numeričkih eksperimenata kojima se modelira uticaj zračenja na integrisana kola uopšte. Šesto poglavlje ima 5 stranica.

Sedmo poglavlje pod naslovom Radijacioni efekti u izolatorima izrađenim u integrisanoj tehnologiji sastoji se od tri potpoglavlja: Zaustavna moć, Rezultati simulacija i Analiza rezultata. U potpoglavlju Zaustavna moć razmatraju se svi tipovi interakcije zračenja sa izolacionim slojevima. To su: Elektronska zaustavna moć (za koju se nekada koristio naziv sudarna zaustavna moć) opisuje gubitak energije naelektrisanih čestica putem interakcija sa elektronima, Gubitak energije teških i lakih naelektrisanih čestica putem interakcija sa elektronima odvija se na donekle različite načine, zbog čega se njihove elektronske zaustavne moći tretiraju zasebno, Lake naelektrisane čestice kao

što su pozitron i elektron dok su teške proton, alfa čestica, pion, mion, triton i deutron, kao i Nuklearna zaustavna moć koja opisuje gubitak energije naelektrisanih čestica u elastičnim rasejanjima na jezgrima. Drugo potpoglavlje pod naslovom Rezultati simulacija prikazuje Monte Carlo simulacije transporta protona, alfa čestica i više vrsta teških jona kroz tanke slojeve izolatora sprovedene su u TRIM modulu softverskog paketa SRIM. U simulacijama su korišćeni monoenergetski snopovi, usmereni pod pravim uglom na površinu izolatorskih filmova. Energija snopa menjana je od 10 keV do 5 MeV, a samo u slučaju protonskog snopa od 10 keV do 10 MeV. Na svakoj energiji snopa, debljina izolatorskog sloja je povećavana sve dok čitav snop ne bi bio zaustavljen u materijalu. Tako dobijena debljina sloja veća je od dometa primarnih čestica koje čine upadni snop, kao i od dometa sekundarnih čestica nastalih prolaskom snopa, što odgovara maksimalnom radijacionom efektu u izolatoru. Simulacije su vršene sa  $10^3$  -  $10^4$  istorija. U potpoglavlju pod naslovom Analiza rezultata se daju rezultati simulacija koji pokazuju da su ispitivani izolatorski filmovi imuni na prolaz protona, alfa čestica i jona energija većih od 1-2 MeV. Snopovi teških naelektrisanih čestica i jona sa energijama većim od ovih imaju zanemarljive gubitke energije, bilo jonizujuće ili nejonizujuće, pri prolasku kroz izolatorske slojeve debljina između 100 nm i 20  $\mu$ m. Značajniji gubici energije javljaju se tek na energijama snopa nižim od  $\sim$  1 MeV. Sedmo poglavlje ima 16 stranica.

U osmom poglavlju pod naslovom Zaključak su ukratko sumirani svi dobijeni rezultati u ovoj doktorskoj disertaciji i iznet je njihov značaj i mogući pravci daljeg istraživanja, tj. autor zaključuje da je u slučaju polikarbonata kao i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ili  $\text{SiO}_2$  filmovi, na kojima je rađeno istraživanje, su bili neosetljivi na jake snopove jona energije veće od 1 MeV. To je utvrđeno pomoću Monte Carlo metode u slučaju težih naelektrisanja. Nejonizujući gubici energije ovih visokoenergetskih čestica su mali i one prolaze kroz filmove ne proizvodeći znatnija izmeštanja atoma. U donjem delu ispitivanog energetskeg opsega (od 10 keV do 1 MeV), međutim, pojavljuju se znatni jonizujući gubici energije, kao i NIEL. Jonizacija i izmeštanje atoma do kojih dovode protoni, alfa čestice i teški joni može da utiče na osobine izolatora i da ugrozi njihovu pouzdanost u sklopu složenih struktura i komponenti. Tačkasti defekti, od kojih se neki ponašaju kao donori nosilaca naelektrisanja, javljaju se u ozračenim izolatorima kao rezultat izmeštanja atoma. Visoko reaktivni slobodni radikali, koji mogu da nastanu u leksanu kada se izloži jonskom snopu, dovode do prekida polimernih lanaca i/ili njihovog umrežavanja, što utiče na izolatorska svojstva polikarbonatnih filmova.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

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

Urađena doktorska disertacija pod naslovom „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“ tretira najaktuelniji problem tehnologije izrade pouzdanih višeslojnih elektronskih kola. Naime, opšti trend ka minijaturizaciji elektronskih komponenata i pakovanje elektronskih komponenata u velikom broju u izuzetno male međusobno izolovane zapremine čini takva integrisana kola veoma osetljivim na pojavu zračenja i na pojavu prenapona. Dok za zaštitu od prenapona postoje standardne komponente kao što su odvodne diode, varistori i gasni odvodnici prenapona, za zaštitu od zračenja ne postoje standardna rešenja koja bi efekisano vršila zaštitu od zračenja uz očuvanja njenih minijaturnih dimenzija. Sve veći stepen elektromagnetne i nuklearne kontaminacije sredine uvodi granične dimenzije mogućeg smanjenja elektronskih komponenti usled nemogućnosti postizanja pouzdane elektromagnetne kompatibilnosti. U budućnosti se vidi moguće rešenje u višestrukoj redundaciji integrisanih kola uz upotrebu NILI elektronskih kola izrađenih u nanotehnologiji. Međutim, dok se ta ideja realizuje (i ako se uopšte realizuje iz razloga visokog zagrevanja) treba raditi na usavršavanju tankih izolacionih slojeva u čemu su značajni rezultati dobijeni i prikazani u radu kandidata Ljubinka B. Timotijevića. Rad kao i dobijeni rezultati su u potpunosti originalni.

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

Kao što je već rečeno na spisku referenci se nalazi 108 referenci. Pošto se radi o relativno novoj i dinamičnoj oblasti naučno istraživačkog rada reference su uglavnom stare manje od 20 godina. Na spisku referenci se nalazi i ne mali broj podataka referenci koje predstavljaju linkove odgovarajućih internet prezentacija. Pored ovih mladih referenci nalazi se i mali broj referenci starijih od 40 godina koje su najčešće povezane sa teoretskim osnovama i korišćenim statističkim metodama. Treba istaći da je u radu izvršen veoma dobar izbor reprezentativnih referenci.

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

Primenjena naučna metoda numeričkog eksperimenta se može smatrati idealnom za klasu koji su razmatrani. Naime, njoj alternativna metoda realnog eksperimenta bi iziskivala neuporedivo veći utrošak vremena i ekonomskih sredstava a obezbedila bi mnogo manji broj podataka potrebnih za statističko zaključivanje. Ovde treba napomenuti da je primenjena simulacija interakcija zračenja sa materijalom metodom Monte Carlo višestruko potvrđena u naučnoj i inženjerskoj praksi.

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

Dobijeni rezultati su primenljivi u slučaju polikarbonata kao i  $Al_2O_3$  ili  $SiO_2$  izolacionih filmova. Pokazano je da su ovi filmovi neosetljivi na jake snopove jona energije veće od 1 MeV.



Nejonizujućí gubici energije ovih visokoenergetskih čestica su mali i one prolaze kroz filmove ne proizvodeći znatnija izmeštanja atoma. U donjem delu ispitivanog energetskog opsega (od 10 keV do 1 MeV), međutim, pojavljuju se znatni jonizujućí gubici energije, kao i NIEL. Jonizacija i izmeštanje atoma do kojih dovode protoni, alfa čestice i teški joni može da utiče na osobine izolatora i da ugrozi njihovu pouzdanost u sklopu složenih struktura i komponenti. Tačkasti defekti, od kojih se neki ponašaju kao donori nosilaca naelektrisanja, javljaju se u ozraćenim izolatorima kao rezultat izmeštanja atoma. Visoko reaktivni slobodni radikali, koji mogu da nastanu u leksanu kada se izloži jonskom snopu, dovode do prekida polimernih lanaca i/ili njihovog umrežavanja, što utiče na izolatorska svojstva polikarbonatnih filmova. Uvođenjem ovih rezultata u proizvodnju izolacionih slojeva se može obezbediti puna pouzdanost u navedenim poljima zračenja što je od velikog značaja za elektronske komponente koje mogu da dođu u takva polja.

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

Kandidat Ljubinko B. Timotijević je definišući problem i cilj teme, te postavkom adekvatnih hipoteza omogućio da izrađena doktorska disertacija bude celovita i potpuno u skladu sa onim što se na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu očekuje. Svojim samostalnim radom prilikom izrade doktorske disertacije kao i prilikom izrade naučnih radova neposredno vezanih za doktorsku disertaciju kandidat Ljubinko B. Timotijević je demonstrirao da suvereno vlada svim metodama naučno-istraživačkog rada karakterističnim za tehničke nauke a posebno za tehnološko-metalurške nauke. Na osnovu svega prethodno rečenog možemo tvrditi da je kandidat Ljubinko B. Timotijević dostigao vrhunsku sposobnost za samostalni naučni rad.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

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

Doktorat kandidata Ljubinka B. Timotijevića ima više naučnih i stručnih doprinosa. Sama primenjena metoda za simulaciju interakcije zračenja sa tankim otpornim filmovima elektronskih kola u integrisanoj tehnologiji je svakako originalan naučni doprinos. Isto se odnosi i na izbor generatora slučajnih brojeva. Pored toga se kao glavni naučni doprinos može smatrati izbor i matematičko modelovanje ispitivanih integrisanih kolanumeričkim eksperimentom. Zahvaljujući brzini ispitivanja interakcije zračenja sa izolacionim strukturama ustanovljena je skoro neograničena otpornost izolacionih slojeva  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  na dejstvo teških jona u najčešćem energetskom intervalu njihovog pojavljivanja. Ovim je rešen, za inženjersku praksu veoma važan problem. Pored ovih glavnih naučnih doprinosa postoji i čitav niz manjih naučnih doprinosa ostvarenih u simulaciji interakcije zračenja sa integrisanim elektronskim komponentama.

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

Osnovni doprinos doktorske disertacije je usveobuhvatnosti primenjene metode. Naime, većina radova posvećenih radijacionoj kompatibilnosti elektronskih sklopova u integrisanoj tehnologiji je vršena realnim eksperimentima u elektromagnetnom ili čestičnom polju zračenja. Takav pristup je bio ograničen sa aspekta parametara polja zračenja u kojima se moglo vršiti istraživanje. Naime, polje zračenja prirodnih i veštačkih radioaktivnih izotopa, uključujući i akceleratora, su pretežno diskretnog tipa odnosno njihove energije su ograničene. Metoda koju je primenio kandidat Ljubinko B. Timotijević omogućava primenom numeričkog eksperimenta ispitivanje radijacione kompatibilnosti u širokom kontinualnom energetsom spektru koje je praktično neograničeno. Tako dobijeni rezultati mnogo više odgovaraju efektima koji se javljaju u realnim uslovima dejstva primarnog i sekundarnog kosmičkog zračenja ili u blizini nuklearnih energetskih postrojenja. Takvim pristupom je kandidat promovisao metodu koja daje brže, tačnije i prirodnim uslovima adekvatnije rezultate.

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

Rezultati prikazani u disertaciji su verifikovani objavljivanjem u sledećim naučnim radovima:

#### **Kategorija M21:**

1. Nikolić, D., Stanković, K., **Timotijević, L.**, Rajović, Z., Vujisić, M.: *Comparative study of gamma radiation effects on solar cells, photodiodes, and phototransistors*, International Journal of Photoenergy, art. no. 843174 (2013) (**IF= 2.663**) (ISSN: 1110662X).  
DOI: 10.1155/2013/843174

2. Simić, B., Nikolić, D., Stanković, K., **Timotijević, L.**, Stanković, S.: *Damage Induced by neutron radiation on output characteristics of solar cells, photodiodes, and phototransistors*, International Journal of Photoenergy, art. no. 582819 (2013) (**IF= 2.663**) (ISSN: 1110662X).  
DOI: 10.1155/2013/582819

3. **Timotijević, L.**, Fetahović, I., Lazarević, D., Vujisić, M.: *Simulation of proton beam effects in thin insulating films*, International Journal of Photoenergy, art. no. 128410 (2013) (**IF= 2.663**) (ISSN: 1110662X).  
DOI: 10.1155/2013/128410

#### **Kategorija M22:**

1. Zdjelarević, N.S., Knežević, I.D., Vujisić, M.L., **Timotijević, L.B.**: *Simulation-based calculations of the proton dose in phase change memory cells*, Nuclear Technology and Radiation Protection, 28(3): 299-307 (2013) (**IF= 1.000**) (ISSN: 1451-3994).  
DOI: 10.2298/NTRP1303299Z

2. **Timotijević, L.B.**, Vujisić, M.L., Stanković, K.D.: *Simulation of radiation effects in ultra-thin insulating layers*, Nuclear Technology and Radiation Protection, 28(3): 308-315 (2013) (**IF= 1.000**) (ISSN: 1451-3994).  
DOI: 10.2298/NTRP1303308T

#### **Kategorija M23:**

1. Dalibor S. Arbutina, Aleksandra I. Vasić-Milovanović, Teodora M. Nedić, Aco J. Janićijević, and **Ljubinko B. Timotijević**: *Possibility of achieving an acceptable response rate of gas-filled surge arresters by substitution of alpha radiation sources by selection of electrode*

*material and the electrode surface topography*, Nuclear Technology and Radiation Protection, 35(3): 223-234 (2020) (IF= 1.057) (ISSN: 1451-3994).  
<https://doi.org/10.2298/NTRP2003223A>

**Kategorija M33:**

1. Pejović, M., Pejović, M., Marić, R., **Timotijević, L.**, Stanković, K.: *Delay response of gas discharge tubes*, Progress in Electromagnetics Research Symposium, pp. 1156-1159., Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2012 Kuala Lumpur; Kuala Lumpur; Malaysia; 27 March 2012 through 30 March 2012 (2012). (ISSN: 15599450; ISBN: 978-193414220-2)
2. Zdjelarević, N., **Timotijević, L.**, Marić, R., Stanković, K., Vujisić, M.: *Calculations of absorbed dose in heavy-ion irradiated phase-change memory cells*, Advanced Materials Research, 906, pp. 81-88., Spring International Conference on Material Sciences and Technology, MST-S 2014; Shanghai; China; 16 April 2014 through 18 April 2014 (2014).

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu navedenog, Komisija smatra da doktorska disertacija kandidata Ljubinka B. Timotijevića, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod nazivom: „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“, 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, postavkom numeričkog eksperimenta, 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 **Ljubinka B. Timotijevića**, diplomiranog inženjera elektrotehnike, pod nazivom: „Radijaciona kompatibilnost tankoslojnih otpornika u integrisanoj tehnologiji“ 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

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Saša Kočinac, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Dragan Kovačević, naučni savetnik

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“