

VIJEĆU PRIRODNO-MATEMATIČKOG FAKULTETA

Predmet: Ocjena podobnosti doktorske teze i kandidata

U skladu sa članom 35, stav 2, Pravila doktorskih studija, Komisija za ocjenu podobnosti doktorske teze i kandidata koju je imenovao Odbor za doktorske studije Univerziteta Crne Gore na sjednici održanoj 12. 5. 2023. god. u sastavu

1. **Dr Predrag Miranović**, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore
2. **Dr Borko Vujičić**, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore
3. **Dr Jovan Mirković**, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore

podnijela je Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta **Izvještaj sa javne odbrane polaznih istraživanja doktorske disertacije i Ocjenu podobnosti teme doktorske disertacije (Obrazac D1)** kandidata **mr Arsa Ivanovića**.

Komisija za doktorske studije PMF-a je na elektronskoj sjednici održanoj 7. 7. 2023. godine, zaključila da dostavljeni Izvještaj sadrži sve elemente propisane Pravilima doktorskih studija i prosljeđuje ga na razmatranje Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta.

Podgorica, 7. 7. 2023. god.

ZA KOMISIJU ZA DOKTORSKE STUDIJE

Goran Popivoda



OCJENA PRIJAVE DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	Mr Arso Ivanović
Fakultet	Prirodno-matematički fakultet
Studijski program	fizika
Broj indeksa	1/19
Podaci o magistarskom radu	Experimental observation of ultrashort laser pulse effects on the autoionization dynamics of argon atoms, atomska, molekularna i optička fizika, Univerzitet Hajdelberg, 2017, C
NASLOV PREDLOŽENE TEME	
Na službenom jeziku	Memristori – od nanočestice do uređaja
Na engleskom jeziku	Memristive nanoscale phenomena – from single nanoparticle to scalable devices
Datum prihvatanja teme i kandidata na sjednici Vijeća organizacione jedinice	
Naučna oblast doktorske disertacije	Nanofizika, nanotehnologija, neuromorfno računarstvo, nanoelektronika
Za navedenu oblast matični su sljedeći fakulteti	
Prirodno-matematički fakultet, UCG	
A. IZVJEŠTAJ SA JAVNE ODBRANE POLAZNIH ISTRAŽIVANJA DOKTORSKE DISERTACIJE	
Javna odbrana polaznih istraživanja doktorske disertacije pod nazivom “Memristori – od nanočestice do uređaja” održana je 25. 05. 2023. u svečanoj sali tehničkih fakulteta u 16:15 h. Kandidat je uspješno prezentovao rezultate polaznih istraživanja pred tročlanom komisijom, koji su ostvareni na studijskom boravku na Institutu Jožef Štefan u Ljubljani. Komisija je obaviještena da je došlo do promjene inostrane institucije za studijski boravak kandidata, umjesto na Institutu “Jožef Štefan”, eksperimentalna mjerenja će biti nastavljena na Nacionalnom institutu za metrološka istraživanja (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - INRiM) u Torinu, Italija. Kandidat je komisiji iznio dalji plan i ciljeve istraživanja u narednom period tokom boravka u INRiM. Članovi komisije su nakon prezentacije dali komentare i predloge za dalji plan istraživanja. Usmena odbrana je završena postavljanjem pitanja članova komisije, na koja je kandidat uspješno odgovorio. Javnoj odbrani prisustvovao je jedan član publike.	
B. OCJENA PRIJAVE TEME DOKTORSKE DISERT	
B1. Obrazloženje teme	

Današnje računarstvo se susrijeće sa problemima rastuće potrebe za računanjem, Von Neumann-ovim uskim grlom (Von Neumann bottleneck), i donjom granicom veličine tranzistora. Morov zakon se više neće moći održati, pa se stoga moraju razvijati pametniji uređaji i računarski sistemi. Jedan takav uređaj se zove memristor, skraćeno od *memory resistor* (otpornik sa memorijom), koji "pamti" istoriju stanja u kojima se nalazio. Ponašanje memristora se može uporediti sa ponašanjem neurona i sinapsi u mozgu živog organizma. U tom pogledu, memristori se mogu primijeniti kao komponente novih računarskih sistema, koji do neke mjere pokušavaju da oponašaju mozak. Takvo računarstvo, čiji se koncept pojavio još 1980-tih godina, naziva se neuromorfno računarstvo.

Ovo istraživanje dopriniće razvoju memristora kao osnovne komponente za neuromorfno računarstvo, kroz ispitivanje i poboljšanje njegovih karakteristika, koje su sklone neidealnostima. Takođe, proučavanjem kvantnih efekata u memristorima, težiće se da memristori posluže u definisanju standarda otpornosti.

B2. Cilj i hipoteze

Cilj ovog istraživanja je da se kroz proučavanje fizičkih svojstava novoosmišljenih konfiguracija memristora, dođe do one konfiguracije sa najoptimalnijim djejtvom, koja oponaša sinapse ili neurone u ljudskom mozgu. Takav memristor bi se dalje inkorporirao u memristorske mreže kao neuromorfne mreže, koje kao jedan od novih principa računanja doprinose razvoju kognitivne obrade podataka, analize velikih podataka i sistema vještačke inteligencije male snage baziranih na mašinskom učenju i Internetu stvari.

Osnovne hipoteze su:

- memristivni sistemi se ponašaju kao vještačke sinapse ili neuroni, zavisno od konfiguracije, i oni oponašaju biološke sisteme u nekoj mjeri
- kvantni efekti memristora se mogu iskoristiti za uvođenje novog standarda otpornosti
- integracijom memristora u neuromorfne mreže dolazi do razvoja energetski i računski efikasnijih sistema koji su prije potrebniji u računarstvu danas

B3. Metode i plan istraživanja

Memristori koji se proučavaju su bazirani na tankim filmovima i sastoje se od dvije elektrode i izolatorskog sloja između njih. Materijali izolatora su SiO_2 , TaOx , kao i NbOx , dok su materijali elektroda srebro, zlato ili platina. Istražuje se uticaj ovih materijala na prebacivanje otpornosti memristora iz jednog stanja u drugo.

Električna karakterizacija uzorka uključuje strujno-naponsku spektroskopiju i vrši se pomoću *Keithley* uređaja uparenih sa *probe station*, koji stimulišu memristor naponskim i strujnim signalima, koji mogu biti kontinualni ili u vidu pulseva. Takođe, vrši se i ispitivanje izdržljivosti memristora, kao i vremena zadržavanja memristora u nekom stanju. Pored toga, ispituju se i kvantni efekti memristora pomoću utvrđenih protokola, kao dio evropskog projekta MEMQuD.

Nadalje, istražuju se svojstva memristora za oponašanje bioloških sinapsi. To uključuje karakterizaciju ponašanja uređaja kao dugoročne i kratkoročne memorije. Ispituju se pravila učenja kao što su neuralna fasilitacija (vrsta kratkoročne sinaptičke plastičnosti), homosinaptička plastičnost, kao i odgovor uređaja na talas električnih pulseva. Takođe, optimizuju se protokoli mjerenja koji uključuju programiranje unutrašnjeg stanja otpornosti memristora, kontrolu opreme za električna mjerenja, i analizu podataka (*Python scripts*).

Zatim, proučava se efekat unutrašnje temperature na vremensku dinamiku procesa u memristorima. Koriste se električni pulsevi različitih amplituda i širina, kao i različite struje ograničenja, što dovodi do različitog ponašanja provodljivosti memristora i strujno-naponske krive.

Strujno-naponska spektroskopija se vrši na tzv. volatilnim i nevolatilnim memristorima, gdje kod prvih imamo naglu i spontanu promjenu stanja, dok se drugi zadržavaju u datom stanju duže. Stoga, prvi pokazuju kratkoročnu a drugi dugoročnu sinaptičku plastičnost. Takođe, moguće je i ispitivati svojstva memristora kao neurona.

B4. Naučni doprinos

Električna karakterizacija memristora će omogućiti ispitivanje njihovih svojstava prebacivanja otpornosti, što doprinosi boljem razumijevanju memristora kao vještačkih sinapsi sa primjenom u neuromorfnom računarstvu. Svojstvo kvantne provodljivosti doprinosi njihovoj ulozi u uvođenju novog standarda otpornosti preko fundamentalnih konstanti prirode.

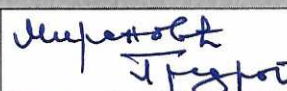
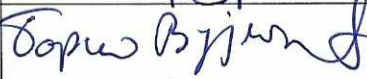
B5. Finansijska i organizaciona izvodljivost istraživanja

Doktorand Arso Ivanović je stipendista Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Crne Gore, i to je njegov glavni izvor finansiranja studija. On nastavlja studijski boravak u okviru doktorskih studija na Nacionalnom institutu za metrološka istraživanja u Torinu, Italija, gdje će izvršiti glavna doktorska istraživanja u predstojećem periodu.

Mišljenje i prijedlog komisije
Nakon usmene prezentacije kandidata na javnoj odbrani polaznih istraživanja, odgovora na pitanja i diskusije koja je uslijedila, konstatovana je aktuelnost teme, kao i kompleksnost datih istraživanja multidisciplinarnog karaktera u oblasti nanofizike. Komisija je dala pozitivnu ocjenu polaznih istraživanja kandidata MSc Arsa Ivanovića i predložila Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta, kao i Senatu Univerziteta Crne Gore, da prihvate izvještaj i odobre nastavak rada na doktorskoj disertaciji.
Prijedlog izmjene naslova
„Električna karakterizacija memristivnih uređaja baziranih na tankim filmovima“
Prijedlog promjene mentora i/ili imenovanje drugog mentora
(titula, ime i prezime, ustanova)
Planirana odbrana doktorske disertacije
2024.
Izdvojeno mišljenje



UNIVERZITET CRNE GORE
ObrazacD1: Ocjena prijave doktorske teze i kandidata

Napomena		
(popuniti po potrebi)		
ZAKLJUČAK		
Predložena tema po svom sadržaju odgovara nivou doktorskih studija.	DA	NE
Tema je originalan naučno-istraživački rad koji odgovara međunarodnim kriterijumima kvaliteta disertacije.	DA	NE
Kandidat može na osnovu sopstvenog akademskog kvaliteta i stečenog znanja da uz adekvatno mentorsko vođenje realizuje postavljeni cilj i dokaže hipoteze.	DA	NE
Komisija za ocjenu podobnosti teme i kandidata		
Prof. dr. Predrag Miranović, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta Crne Gore, predsjednik		
Prof. dr. Borko Vujičić, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta Crne Gore, član		
Prof. dr. Jovan Mirković, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta Crne Gore, mentor		
U Podgorici, 5. 6. 2023. MP DEKAN		



UNIVERZITET CRNE GORE
ObrazacD1: Ocjena prijave doktorske teze i kandidata

PRILOG

PITANJA KOMISIJE ZA OCJENU PRIJAVE DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA	
Prof. dr. Predrag Miranović, predsjednik komisije	Možete li da precizirate koje materijale ćete koristiti za vaše uzorke koje eksperimentalno istražujete i zašto?
Prof. dr. Jovan Mirković, mentor	Koje metode ćete koristiti za analizu podataka i programiranje uređaja za električnu karakterizaciju?
Prof. dr. Borko Vujičić, član komisije	Preko kojih fundamentalnih konstanti možete da izrazite otpornost kod memristora?
(Titula, ime i prezime člana komisije)	
(Titula, ime i prezime člana komisije)	
PITANJA PUBLIKE DATA U PISANOJ FORMI	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
ZNAČAJNI KOMENTARI	