

Univerzitet Crne Gore
Prirodno-matematički fakultet

Džordža Vašingtona b.b.
1000 Podgorica, Crna Gora

tel: +382 (0)20 245 204

fax: +382 (0)20 245 204

www.pmf.ac.me

Broj:

2024/01-2055/2

Datum:

05.09.2024

UNIVERZITET CRNE GORE

-CENTAR ZA DOKTORSKE STUDIJE-

U prilogu akta dostavljamo odluku Vijeća Prirodno matematičkog fakulteta sa CXX sjednice održane 3.9.2024.godine.





**Univerzitet Crne Gore
Prirodno-matematički fakultet**

Džordža Vašingtona b.b.
1000 Podgorica, Crna Gora

tel: +382 (0)20 245 204

fax: +382 (0)20 245 204

www.pmf.ac.me

Broj:

2024/01-2055/1

Datum:

05. 09. 2024 god

Na osnovu člana 64 stav 2 tačka 8 Statuta, a u vezi sa članom 43 i 44 Pravila doktorskih studija Univerziteta Crne Gore, Vijeće Prirodno-matematičkog fakulteta na CXX sjednici održanoj dana 03.09.2024. godine, donijelo je

ODLUKU

I

Prihvata se Izvještaj komisije za ocjenu prijave doktorske disertacije pod nazivom "*Korelacija pulsnih događaja na grafenskim nanotrakama za memristivne primjene*" kandidata Stefana Šćepanovića.

II

Predlažemo Senatu Univerziteta Crne Gore **da prihvati izvještaj komisije za ocjenu prijave doktorske disertacije** "*Korelacija pulsnih događaja na grafenskim nanotrakama za memristivne primjene*" kandidata Stefana Šćepanovića u sastavu:

1. Dr Jovan Mirković, redovni profesor na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta Crne Gore (naučna oblast: Fizika čvrstog stanja);
2. Dr Predrag Miranović, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore (naučna oblast: Fizika čvrstog stanja) i
3. Dr Borko Vujičić, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore (naučna oblast: Fizika čvrstog stanja)

III

Predlog se dostavlja Centru za doktorske studije i Senatu Univerziteta Crne Gore na dalju proceduru.



Na osnovu člana 8 stav 4, a u vezi sa članom 32a Pravila doktorskih studija, Odbor za doktorske studije, nakon sprovedenog postupka glasanja, na sjednici održanoj 06. 06. 2024. godine dao je

SAGLASNOST

I

Da se prihvati prijedlog Vijeća Prirodno-matematičkog fakulteta, broj 2024/01-990/1 od 29. 04. 2024. godine, za imenovanje Komisije za ocjenu prijave doktorske disertacije mr Stefana Šćepanovića, u sastavu: dr Predrag Miranović, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore, dr Borko Vujičić, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore i dr Jovan Mirković, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore.

OBRAZLOŽENJE:

Odboru za doktorske studije dostavljen je prijedlog Prirodno-matematičkog fakulteta broj 2024/01-990/1 od 29. 04. 2024. godine za imenovanje Komisije za ocjenu prijave doktorske disertacije mr Stefana Šćepanovića, u gore navedenom sastavu.

Pravilima doktorskih studija propisano je da Komisija ima, po pravilu, tri člana, od kojih je jedan član mentor. Članovi komisije moraju biti iz naučne/umjetničke oblasti iz koje se doktorska teza predlaže. Uvidom u prijavu teme, zaključeno je da je predložena Komisija formirana u skladu sa Pravilima doktorskih studija.

Nakon sprovedenog postupka glasanja, od ukupno 11 članova Odbora, glasalo je 9 članova – 9 glasova **ZA**, nije bilo glasova protiv i uzdržanih, utvrđen je prijedlog kao u dispozitivu.

Broj: 2024/03-1355/43/2

Podgorica, 06. 06. 2024. godine



Predsjednik Odbora za doktorske studije

Prof. dr Boris Vukićević



OCJENA PRIJAVE DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	MSc Stefan Šćepanović
Fakultet	Prirodno-matematički fakultet, UCG
Studijski program	Fizika
Broj indeksa	1/22
Podaci o magistarskom radu	(naziv: „Manipulacije na atomskoj skali i dekonvolucija stanja elektrona”, naučna oblast: nanofizika; UCG, godina završetka, 2022. g, srednja ocjena: 9,45)
NASLOV PREDLOŽENE TEME	
Na službenom jeziku	Korelacija pulsnih događaja na grafenskim nanotrakama za memristivne primjene
Na engleskom jeziku	Correlations of spiking events on graphene nanoribbon for memristive applications
Datum prihvatanja teme i kandidata na sjednici Vijeća organizacione jedinice	29.04.2024. godine
Naučna oblast doktorske disertacije	Nanofizika
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 "Korelacija pulsnih događaja na grafenskim nanotrakama za memristivne primjene" održana je 17. 7. 2024. godine sa početkom u 10 sati, pred Komisijom u sastavu: prof. dr Jovan Mirković, mentor, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta UCG, prof. dr Predrag Miranović, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta UCG, prof. dr Borko Vujičić, redovni profesor Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore. S obzirom da se doktorand Stefan Šćepanović nalazi u Ljubljani, gdje na Institutu Jožef Stefan radi eksperiment, odbrana je organizovana hibridno, koristeći i zoom platformu. Odrani je prisustvovao i komentor prof. dr Abdou Hassanien, Institut Jožef Stefan, Ljubljana. U uvodnom dijelu, kandidat je upoznao članove komisije sa aktuelnim aspektima predložene teme. Zatim je detaljno kroz prezentaciju predstavio dosadašnje rezultate istraživanja. Prve rezultate istraživanja doktorand Stefan Šćepanović je već publikovao u naučnom časopisu Scientific Reports (Šćepanović, S., Kimouche, A., Mirković, J. et al. Delocalized spin states at zigzag termini of armchair graphene nanoribbon. Sci Rep 14, 11641 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-62624-9) i tokom odbrane prikazao dobijene rezultate i zaključke istraživanja. Detaljno je predstavljen plan daljih istraživanja, kao i materijal i metode istraživačkog rada. Po završetku izlaganja članovi Komisije su postavili pitanja (u prilogu) na koje je doktorand dao odgovore i potrebna pojašnjenja. Komisija je jednoglasno donijela odluku da je kandidat uspješno odbranio predloženu temu doktorskih istraživanja, ciljeve i metodologiju rada i donijela zaključak da je tema doktorskih istraživanja podobna.	

B. OCJENA PRIJAVE TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

B1. Obrazloženje teme

Predložena tema se odnosi na dizajn i neinvazivnu karakterizaciju novih nano-memristivnih materijala sa robusnim funkcionalnostima pogodnim za neuromorfno inženjerstvo. Ovi materijali su napravljeni od nanočestica legiranih metala koje su pričvršćene za grafenske nanotrake sa dielektričnim medijem. Novina transporta naelektrisanja je u tome što kombinuje prednosti migracije pokretnih metalnih katjona vođenih poljem kroz anizotropnu dielektričnu matricu sa efektima gejtunga kao sekundarnog kanala. Slično prethodnim studijama (Scientific Reports 2019, Nanomaterials 2021 i Particle and Particles Systems characterization 2023), pojedinačne i agregati metalnih nanočestica biće okarakterisani da bi se mapirala njihova memristivna svojstva prebacivanja u različitim dielektricima, koristeći provodnu mikroskopiju atomske sile, kao i konvencionalna mjerenja sa dvije sonde. Zbog složenosti transporta naelektrisanja u ovom sistemu, pitanja od značaja su adekvatno ispitana sistematskim studijama od jedne do nekoliko stotina nanočestica proizvedenih na vrhu AFM-a (memtips). Ovi memtips uređaji omogućavaju mjerenja bez pojmeranja i s toga se vremenski zavisne korelacije događaja prebacivanja mogu lako dobiti, čak i na sobnoj temperature.

B2. Cilj i hipoteze

Da bi se kontrolisalo memristivno djelovanje, potrebno je da se prevaziđe stanje tehnike i prvo se pozabavi vremenskom složenošću stohastičkih i korelacionih procesa (uključujući i pulsne događaje) za koje se pokazalo da su do sada veoma izazovna pitanja. Predloženo je rješenje ovih pitanja testiranjem sledećih hipoteza:

- H1 Kanalisanje filamentarnog procesa od jedne ili više nanočestica kroz vrh specijalno dizajniranog AFM vrha omogućiće mjerenja bez pomaka.
- H2 Koristeći dielektrična svojstva GNR-a za fokusiranje struje metalnih jona moguće je svesti stohastičku varijabilnost na minimum za stabilan rad.
- H3 Nivo memristivnog prebacivanja sa plazmanskim efektom biće moguće kontrolisati preko pod-praga opsega ugljeničnih nanocjevčica i GNR-a.

B3. Metode i plan istraživanja

Plan istraživanja:

Cilj istraživanja je da se iskoristi hibridno dejstvo između karakteristika efekta polja GNR ili mreže tankog filma ugljeničnih nanocijevi i difuznih memristivnih svojstava nanočestica legiranih metala. Istraživanje je dizajnirano tako da se postignu 3 prekretnice:

1. Lokalno memristivno uključivanje na metalni SWCNT:

U prvoj godini se radi na optimizaciji dielektričnih svojstava GNR-a i nanočestica iz posebno pripremljenih metalnih meta, kao što je AgAu legura. Korišćenjem anizotropnih osobina SWCNT i/ili grafenske nanotrake (GNR), dielektrična matrica će biti projektovana da minimizira varijacije u filamentarnoj putanji između AFM vrha i ugljenične nanocijevi.

Da bi se identifikovao početak jonske emisije i relevantni mehanizam transporta jona, svaki tip legiranih nanočestica će se sistematski proučavati korišćenjem neinvazivnih C-AFM tehnika. Slično našim prethodnim studijama, Scientific Reports, 2019, potrebno je da tražimo optimizovanu kompoziciju, kao i dielektričnu matricu da bismo dobili stabilne memristivne akcije pri relativno niskom naponu (ispod 2 volta). Ovaj proces je veoma važan prije uključivanja SWCNTs mreže u

dielektričnu matricu.

U cilju proučavanja mehanizma transporta naelektrisanja izvršiće se prostorno mapiranje električnih svojstava, koristeći pristup mješovite povratne sprege. Fokusiranjem na jednu po jednu nanočesticu, mogući scenariji transporta naelektrisanja, kao što su skakanje promjenljivog opsega, tuneliranje uz pomoć fluktuacije, difuzija, itd. mogu se identifikovati korišćenjem takvih lokalnih tehnika. U ovom slučaju, jedna nanočestica se može lako identifikovati kroz varijacije u lokalnim dielektričnim funkcijama, kao i fazno snimanje, tako da se IV karakteristike dobijaju na određenoj poziciji.

Ovdje je važno napomenuti da je izabrano da se izvrši karakterizacija na metalnoj jednozidnoj nanocjevčici, kako bi se precizno pratila memristivna struja, pomoću uzetih lokalnih spektra na i van nanočestice. Na taj način moguće je testirati različite legirane NP i izvući relevantna električna svojstva. Pored toga, očekuje se da će netaknuti metalni CNT pokazati slične vrijednosti za pokretljivost elektrona i šupljina, što će takođe pomoći da se izbjegne asimetrija između transporta elektrona i rupa, tj. uređaji mogu podjednako da rade i u direktnim i u reverznim karakteristikama (što je veoma važno za logičke kapije).

2. Dejstvo kapije memristivnih uređaja:

Jedno od najistaknutijih svojstava netaknutog poluprovodničkog SWCNT-a je sposobnost podešavanja električne struje u velikom opsegu preko gajtinga polja. Ovdje će fokus biti na srž studija mapiranjem interakcije između memristivnih radnji u blizini pod-prag opsega uređaja. Na osnovu prethodnih C-AFM studija SWCNT-a i drugih materijala, gejtning je izuzetno moćan alat za kontrolu memristivne struje u velikom dinamičkom opsegu i s toga se može koristiti kao ključni parametar za variranje memristivnog stanja i izvođenje logičkih operacija. Kombinovana akcija pojačanja signala, otpornog skladištenja i logičkih operacija čini ovaj uređaj veoma relevantnim za neuromorfne proračune.

Prvo se uređaj proizvodi selektivnim deponovanjem netaknutih poluprovodničkih SWCNT-a, korišćenjem reaktora sa plutajućim katalizatorom koji je opremljen suvom elektroforetskom tehnikom. Korišćenjem ovog procesa, dobijamo uređaj koji je 95% napravljen od poluprovodničkog SWCNT-a koji direktno premošćuje metalne jastučice. Ovi metalni jastučici djeluju kao izvorne i odvodne elektrode za jednocijevni uređaj. Ponašanje poluprovodnika se verifikuje ili izmjerenim dielektričnim odzivom ili konvencionalnim efektom polja preko lokalnog AFM kontakta ili globalnog zadnjeg gejta.

U zavisnosti od predznaka AFM vrha u odnosu na SWCNT, naelektrisanja se mogu preferencijalno uskladištiti ili iscrpiti lokalno, što olakšava pokretanje i podešavanje memristivnog dejstva pri relativno niskom naponu u SWCNT-u. U svakom slučaju, preduslov je nametnut pokretačkom naponu da ne izazove strukturnu degradaciju samog SWCNT-a. Uz pomoć zadnje kapije, rad uređaja se pokreće unutar pod-prag područja kako bi se maksimizirale performanse tako da se memristivna struja pokreće kroz veliki dinamički opseg. Neka pitanja od značaja su sažeta u nastavku:

1. Mehanizam transporta naelektrisanja.
2. Maksimalna memristivna struja.
3. Prozor pouzdanosti rada „SET i RESET vrijednosti“.
4. Vrijednost memristivnog stanja.
5. Otpornost uređaja na produženi rad.
6. Optički modulirana memristivna akcija.

Pošto je od interesa primjena uređaja, ukupne IV karakteristike će se mjeriti sa konvencionalnim mjerenjima jednosmjerne struje da bi se proizveli prototip uređaji za jednostavne logičke kapije.

3. Optički modulirani GNR i SWCNT memristor;

Poslednja prekretnica u istraživanju je prikupljanje pojačanja bliskog polja između nanočestica, kako bi se pokrenuli putevi za efikasan transport jona. U ovim eksperimentima biće dizajniran sistem, tako da uključuje rezonantne optičke impulse sa ograničenim površinskim plazmonima nanočestica (200-500 nm). Intenzitet i vremenske oznake na ovim rezonantnim signalima bi djelovale kao obrazac učenja za memristivne uređaje. Sposobnost memristivnih struja da emuliraju profil signala sa vremenskim žigom će se istražiti za nadgledano učenje. Imajući to na umu, uređaj radi unutar pod-prag oblasti, tako da je memristivno djelovanje olakšano (kao i modulirano) izvorom svjetlosti dalekog polja. Prvo će se studija izvoditi na memtip uređajima različitog radijusa zakrivljenosti prije nego što se primjeni na makroskopske uređaje.

Moguća jaka sprega ograničenih površinskih plazmona i pojačanje bliskog polja između pojedinačnih nanočestica može djelovati kao okidač posrednog koherentnog prebacivanja u većim sistemima nanočestica. Iz tog razloga, proučavaće se vremenski zavisni efekat korelacije optički moduliranih memristora mijenjajući veličine sistema da bi se uključilo od nekoliko do par stotina nanočestica.

B4. Naučni doprinos

Postoji nekoliko zanimljivih očekivanih rezultata ovih istraživanja, na primjer:

1. Optimizovana sinteza, distribucija i karakterizacija i numeričke simulacije nanočestica sa anizotropnom dielektričnom matricom na raznim metalnim površinama.
2. IV mjerenja bez drifta jedne i nekoliko nanočestica na sobnoj temperaturi.
3. Izvještaj o stohastičkoj varijansi i kako na nju utiču dielektrična anizotropija i prečnik vrha.
4. Optički modulirana memristivna akcija sa GNR-om.

B5. Finansijska i organizaciona izvodljivost istraživanja

Istraživanje se realizuje u saradnji sa Institutom Jožef Stefan, Ljubljana, gdje se obavlja eksperimentalni dio istraživanja, odnosno rad u laboratoriji, uz superviziju komentora iz Instituta Jožef Stefan, prof. dr Abdou Hassanien. Finansijska sredstva su obezbijeđena iz budžeta naučnoistraživačkih projekata.

Mišljenje i prijedlog komisije

(dati mišljenje i prijedlog)

Nakon javnog izlaganja i diskusije, Komisija je dala pozitivnu ocjenu podobnosti teme doktorske disertacije. Komisija je jmišljenja da je kandidat jasno, koncizno i precizno iznio plan istraživanja, obrazložio i opravdao aktuelnost i naučni doprinos teme, kao i da je kandidat pokazao potencijal za samostalni naučnoistraživački rad.

Komisija predlaže Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta UCG da prihvate ovaj izvještaj i odobri nastavak istraživačkog rada na doktorskoj disertaciji.

Prijedlog izmjene naslova

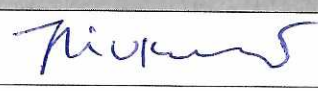
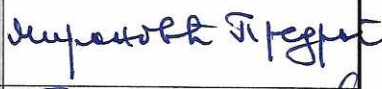
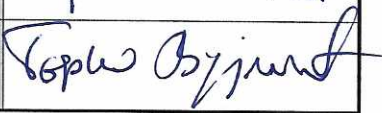
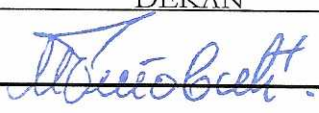
(po potrebi predložiti izmjenu naslova)

Prijedlog promjene mentora i/ili imenovanje drugog mentora

(titula, ime i prezime, ustanova)

Planirana odbrana doktorske disertacije

2025. godina, semestar VI
Izdvojeno mišljenje
(popuniti ukoliko neki član komisije ima izdvojeno mišljenje)
Ime i prezime

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 Jovan Mirković, PMF, UCG, Crna Gora		
Prof. dr Predrag Miranović PMF, UCG, Crna Gora		
Prof. dr Borko Vujičić, PMF, UCG, Crna Gora		
U Podgorici, 19. 07. 2024.		
		DEKAN 

PRILOG

PITANJA KOMISIJE ZA OCJENU PRIJAVE DOKTORSKE TEZE I KANDIDATA	
prof. dr Jovan Mirković, PMF, UCG, Crna Gora	Koji su bili eksperimentalni uslovi tokom mjerenja? Koja je oprema korišćena za izvođenje mjerenja?
prof. dr Predrag Miranović PMF, UCG, Crna Gora	Odakle potiču atomi vodonika na grafenskim nanotrakama? Kako uklanjanje atoma vodonika pomaže u realizaciji memristora?
prof. dr Borko Vujačić, PMF, UCG, Crna Gora	Zašto je kao podloga gorišćen monokristal zlata Au(111)?
PITANJA PUBLIKE DATA U PISANOJ FORMI	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
(Ime i prezime)	
ZNAČAJNI KOMENTARI	