



PRIJAVA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	Msc Stefan Šćepanović
Fakultet	Prirodno-matematički
Studijski program	Fizika
Broj indeksa	1/22
Ime i prezime roditelja	Srdan Šćepanović
Datum i mjesto rođenja	22.07.1997. godine
Adresa prebivališta	IV Proleterske Crnogorske Brigade, bb. Danilovgrad
Telefon	067 012 563
E-mail	stefanscepanovic@gmail.com
BIOGRAFIJA I BIBLIOGRAFIJA	
Obrazovanje	• Master studije iz fizike, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica; 2020-2022. • Prirodno-matematički fakultet - fizika (Osnovne studije), Univerzitet Crne Gore, Podgorica; 2017-2020. • Specijalističke studije iz elektronike, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet Crne Gore, Podgorica; 2019-2020. • Elektrotehnički fakultet - elektronika, telekomunikacije i računari (Osnovne studije), Univerzitet Crne Gore, Podgorica; 2016-2019.
Radno iskustvo	Stručno osposobljavanje u Fondaciji za promociju nauke (PRONA), Podgorica, 2020. godine
Popis radova	• S. Šćepanović, J. Mirković and A. Hassanien. Graphene nanoribbons as tunnelling tip for selective visualization of edge states, Abstract book: International meeting on superconducting quantum materials and nanodevices: Monte Super 2023, 17-21 April 2023, Budva, Montenegro, pp. 89
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
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 gejtinga kao sekundarnog kanala.	

Slično našim 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 temperaturi.

Pregled istraživanja

1. Uvod:

Memristor [1], memorijski otpornik sa dva terminala, teorijski ga je 1971. godine predložio Leon Čua [2] kao nedostajući element kola koji ispunjava nelinearnu vezu između naelektrisanja (q) i magnetnog fluksa (Φ_m); naime, otpor memristora ili memistansa (m) = $d\Phi_m / dq$. Za razliku od drugih elemenata kola, memristor može da skladišti i obrađuje informacije što ga čini veoma pogodnim za projektovanje logike pune stanja sa sinaptičkim operacijama koje prevazilaze konvencionalnu Fon Nojmanovu elektronsku arhitekturu [3].

2. Najsavremenije u predloženoj oblasti istraživanja i pregled relevantne literature:

Trenutni predlog se fokusira na dizajn i neinvazivnu karakterizaciju novih nano-memristivnih materijala sa robusnim funkcionalnostima pogodnim za neuromorfni inženjering. Neuromorfni inženjering opisuje nastojanje da se imitiraju neuronske strukture i prenesu određeni aspekti njihovih naprednih funkcionalnosti u elektronska kola [4-6]. Oblast je evoluirala kasnih 1980-ih oko rada Karvera Mida na realizaciji uređaja inspirisanih neuronima, poput adaptivne mrežnjače u smislu integrisanih elektronskih analognih sistema [7]. Od tada, koncept neuromorfnog inženjeringa je proširen na pristupe u rasponu od mreža dubokog učenja, koje se obično oslanjaju na konvencionalne von-Neumannove računarske uređaje i razrađen softver, do realizacije biološki inspirisanih računarskih paradigmi. Iako je poslednji pristup još uvijek daleko od dostizanja pune tehnološke zrelosti, on pokazuje izvanredno dugoročni potencijal za aplikacije jer daje velika obećanja za realizaciju visoko paralelnih, efikasnih, biološki motivisanih računarskih uređaja [8].

Svojstva transporta memristivnih uređaja imaju veoma slične karakteristike kao prihvatanje/oslobađanje jona u biološkim sinapsama. Ova sličnost između memristora i Hodkin-Huklei moda za neurone je već pomenuta u radu L. Chua iz 1971. godine [2]. Ponašanje analognih višeslojnih prebacivačkih uređaja je veoma slično neuronskim sinapsama, gdje primjena impulsa napona izaziva postepenu reverzibilnu promjenu otpora. Modeli pulsnih neurona za pojedinačne neurone, kao i za sklopove neurona, su detaljno objašnjeni (V. Gerstner i V. Kistler [9]). U suštini, osnovno stanje neurona je stanje mirovanja i može biti pobuđen dovoljno velikim stimulusom da izloži naponski puls (akcioni potencijal). Nakon ovog pulsa, neuron je u refraktornom periodu i dalji pulsevi se efektivno potiskuju. Nakon povezivanja dva neurona sinapsom, promjena u sinaptičkoj težini, koja u suštini opisuje otpor ove veze, je vođena vremenskim intervalom između događaja pulseva u pre- i post-neuronu. Drugim riječima, adekvatan vremenski interval dovodi do jačanja sinaptičke veze, dok neusklađenost u vremenu pulseva dovodi do slabljenja veze. Ovo je takozvana plastičnost (STDP) koja je zavisna od vremena pulsa. U zavisnosti od vremenske razlike, sinaptička težina se povećava (dugotrajno potenciranje) ili smanjuje (dugotrajna depresija), što se u osnovi odnosi na učenje. Ovo ponašanje se lako reprodukuje pomoću vještačkih neuronskih i sinaptičkih uređaja zasnovanih na memristivnim uređajima [1, 10, 11]. Posljednjih godina, istraživanja su fokusirana na integraciju velikog broja takvih vještačkih sinapsi u nizove poprečnih šipki za praktične primjene. U ovom kontekstu, takođe su u fokusu istraživanja višeslojne mreže sa jednim ili više skrivenih slojeva (slično kao u softverskom dubokom učenju). Dobar pregled

Istraživačkih aktivnosti u ovoj oblasti daju D. Ielmini et al. [12] i T. Chang et al. [13]. Osim što oponašaju STDP, memristivni uređaji se takođe razmatraju za realizaciju daljih biološki motivisanih funkcionalnosti, npr. adaptacija puls frekvencije je prijavljena u memristivno spregnutim oscilatorima [14, 15]. Jedan posebno važan aspekt u biološkim neuronskim mrežama je bliska veza između detekcije i obrade signala. Ustvari, neuroni se ne nalaze samo u našem mozgu, već su rasprostranjeni po cijelom ljudskom tijelu i služe za prenos i obradu senzornih signala. Do sada je ovaj aspekt (spoj detekcije i obrade signala) ostao u velikoj mjeri neistražen zbog nedostatka detaljnih informacija o fizici memristivnog stanja na nanoskali. Na osnovu prethodnih studija o ugljeničnim nanocjevčicama, razvili smo metodologiju [16-18] za mapiranje svojstava prebacivanja na nanorazmjeri [19]. Drugi otvoreni problem je statistička varijansa u svojstvima prebacivanja memristivnih uređaja koja ometa njihovu upotrebu u komercijalnim aplikacijama.

U nedavnim studijama [20, 21], bavili smo se ovim problemom integracijom memristivnog kanala na AFM vrh. Metodologija koju smo usvojili u tom radu nam je omogućila da mapiramo dugoročni odziv, koji je bio nedostupan prethodnim tehnikama.

Cilj i hipoteze

Da bi se kontrolisalo memristivno djelovanje, potrebno je da se prevaziđe stanje tehnike i prvo se pozabavi vremenskom složenosti u 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 Koristeci dielektrična svojstva GNR-a za fokusiranje struje metalnih jona moguće je svesti stohastičku varijabilnost na minimum za stabilan rad.
- H3 Nivo memristivnog prebacivanja sa plazmonske efektom bitiće moguće kontrolisati preko pod-praga opsega ugljeničnih nanocjevčica i GNR-a.

Materijali, 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 metala, kao što je AgAu legura. Korišćenjem anizotropnih osobina SWCNT i/ili grafenske nanotrake (GNR), dielektrična matrica bitiće 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 bitiće 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 SWCNT 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, moguće su 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, pomoc u 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 pomoc i 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, gejting je izuzetno moc an 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 jastučiće. Ovi metalni jastučići 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 gejtja.

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 pomoc 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;

Posljednja 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.

Očekivani 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.

Spisak objavljenih radova kandidata

S. Šćepanović, J. Mirković and A. Hassanien. Graphene nanoribbons as tunnelling tip for selective visualization of edge states, Abstract book: International meeting on superconducting quantum materials and nanodevices: Monte Super 2023, 17-21 April 2023, Budva, Montenegro, pp. 89

Popis literature

- [1] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, and R.S. Williams. Nature, 453, 80–83 (2008).
- [2] L.O. Chua, Circuit Theory, 18, 507 (1971).
- [3] E. Linn, R. Rosezin, S. Tappertzhofen, U. Böttger and R. Waser, Nanotechnology. 23, 305205 (2012).
- [4] G.W. Burr, B.N. Kurdi, J.C. Scott, C.H. Lam, K. Gopalakrishnan, R.S. Shenoy, Overview of candidate device technologies for storage-class memory, IBM J. Res. Dev. 52, 449 (2008).
- [5] A. Amirsoleimani, F. Alibart, V. Yon, J. Xu, M. R. Pazhouhandeh, S. Ecoffey, Y. Beilliard, R. Genov, and D. Drouin, Adv. Intell. Syst. 2, 2000115 (2020)
- [6] M. A. Zidan¹, J. P. Strachan and W. D. Lu, Nature Electronics, 1, 22 (2018)
- [7] C. Mead, Neuromorphic Electronic Systems, Proc. IEEE. 78 (1990) 1629–1636.
- [8] S.H. Tan, P. Lin, H. Yeon, S. Choi, Y. Park and J. Kim, APL Mater. 6 120901 (2018).
- [9] W. Gerstner and W. Kistler, Spiking neural models: single neurons, populations, plasticity, 2002.
- [10] O. Lupan et al. Small. 13 (2017) 1602868.
- [11] O. Lupan, V. Cretu, V. Postica, N. Ababii, O. Polonskyi, V. Kaidas, and R. Adelung, (2016). Sensors and Actuators B: Chemical, 224, 434–448.
- [12] D. Ielmini, Microelectron. Eng. 190 (2018) 44–53.
- [13] T. Chang, Y. Yang, W. Lu, IEEE Circuits Syst. Mag. 13 (2013) 56–73.
- [14] J. Benda and A.V.M. Herz, Neural Comput. 15 (2003) 2523–2564.
- [15] M. Ignatov, M. Ziegler, M. Hansen, A. Petraru, H. Kohlstedt, Front. Neurosci. 9 (2015) 1–9.

- [16] A. Kovič, A. Žnidaršič, A. Jesih, A. Mrzel, M. Gabersček, and A. Hassanien, *Nanoscale Research Letters*, 7, 567 (2012).
- [17] A. Znidarsic, A. Kaskela, P. Laiho, M. Gaberscek, Y. Ohno, A. G. Nasibulin, E. I. Kauppinen and A. Hassanien, *J. Phys. Chem. C*, 117 (25), pp 13324–13330 (2013).
- [18] M. H. Hassan, M. H. Alkordi and A. Hassanien, *Materials Letters*, 13-16, 246 (2019).
- [19] A. Vahl, N. Carstens, T. Strunskus, F. Faupel, and A. Hassanien, *Sci Rep* 9, 17367 (2019).
- [20] N. Carstens, A. Vahl, O. Gronenberg, T. Strunskus, L. Kienle, F. Faupel and A. Hassanien, *Nanomaterials* 11(2) 265 (2021).
- [21] N. Carstens, T. Strunskus, F. Faupel, A. Hassanien and A. Vahl. *Part. Part. Syst. Charact.* 2200131 (2023).
- [22] A. Hassanien and M. Tokumoto, Y. Kumazawa, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba *Appl. Phys. Lett.* 73, str. 26 3839-3841, (1998).
- [23] A. Hassanien, A. Mrzel, M. Tokumoto, and D. Tománek, *Appl. Phys. Lett.* 79, Str 4210-4212, (2001).
- [24] A. G. Nasibulin, P. V. Pikhitsa, H. Jiang, D. P. Brown, A. V. Krasheninnikov, Anton S. Anisimov, P. Queipo, A. Moisala, D. Gonzalez, G. Lientschnig, A. Hassanien, Sergey D. Shandakov, G. Lolli, D. E. Resasco, M. Choi, D. Tománek and E. I. Kauppinen, *Nature Nanotechnology*, 2, str 156–161, (2007).
- [25] W. Lu, Y. Xiong, A. Hassanien, W. Zhao, M. Zheng and L. Chen, *Nano Lett.* Vol. 9, no. 4, str.1668-1672. 2009
- [27] A. Hassanien, *Adv. Electron. Mater*, 5, 1800247, (2019).
- [28] A. Hassanien, *Phys. Status Solidi B*, 1900346, (2019)
- [29] A. Hassanien, B. Zhou and A. Kobayashi, *Adv. Electron. Mater*, 10, 2000461, (2020).

SAGLASNOST PREDLOŽENOG/IH MENTORA I DOKTORANDA SA PRIJAVOM

Odgovorno potvrđujem da sam saglasan sa temom koja se prijavljuje.

Prvi mentor	prof dr. Jovan Mirković	<i>Jovan Mirkovic</i>
Drugi mentor	prof dr. Abdou Hassanien	<i>Hassanien</i>
Doktorand	Stefan Šćepanović	<i>Stefan Šćepanovic</i>
IZJAVA		
Odgovorno izjavljujem da doktorsku disertaciju sa istom temom nisam prijavio ni na jednom drugom fakultetu. U Podgorici, 12. 4. 2024. god. Stefan Šćepanović <i>Stefan Šćepanovic</i>		

