



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET



PRIMENA MEMRISTORA NA BAZI HALKOGENIDA U ODREĐIVANJU SINAPTIČKE PLASTIČNOSTI

- MASTER RAD -

Kandidat :
Atila Levai

Mentor:
dr Kristina Čajko

Novi Sad, 2026.

Predgovor

Ovim putem želim da izrazim iskrenu zahvalnost dr Kristini Čajko, naučnom saradniku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu i mentoru ovog rada, na saradnji, podršci i značajnoj pomoći tokom izvođenja eksperimentalnih merenja, obrade i analize podataka, interpretacije rezultata, kao i tokom pisanja rada. Njeni saveti, stručna pomoć i posvećenost značajno su doprineli kvalitetu ovog rada.

Zahvaljujem se svim profesoricama i profesorima koji su mi nesebično prenosili svoje znanje i doprineli mom obrazovanju.

Posebno se zahvaljujem majci, sestri i bratu na strpljenju, razumevanju i podršci.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj supruzi Meliti i ćerki Oliviji, na ljubavi, podršci i snazi koju su mi pružale. Bez njih sigurno ne bih bio tu gde sam danas.

Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Memristor.....	4
2.1. Teorijske postavke.....	4
2.2. Osobine memristora.....	6
2.3. Memristor na bazi halkogenida iz Ag-As-S-Se sistema.....	8
3. Struktura biološkog neurona.....	12
4. Sinapsa.....	15
4.1. Sinaptička plastičnost.....	16
4.2. Određivanje sinaptičke plastičnosti.....	17
5. Zaključak.....	21
Literatura.....	22

1. Uvod

Savremeni razvoj informacionih tehnologija i veštačke inteligencije sve više usmerava istraživanja ka razvoju novih računarskih sistema koji funkcionalno oponašaju način rada ljudskog mozga. Za razliku od klasičnih računarskih sistema zasnovanih na Fon Nojmanovoj (eng. *Von Neumann*) arhitekturi, kod kojih su memorija i procesorska jedinica fizički odvojene, biološki nervni sistem omogućava paralelnu obradu velikog broja informacija uz veoma malu potrošnju energije, veliku brzinu obrade i visok stepen adaptivnosti. Upravo zbog toga poslednjih godina intenzivno raste interesovanje za razvoj neuromorfnih sistema, odnosno računarskih sistema koji pokušavaju da reprodukuju osnovne principe rada bioloških neuronskih mreža. U tom kontekstu, memristori privlače posebnu pažnju jer omogućavaju objedinjavanje funkcija skladištenja i obrade informacija u okviru jednog uređaja, čime se smanjuje potreba za prenosom podataka između memorije i procesora i njihovo funkcionisanje približava principima rada bioloških neuronskih mreža [1,2].

Jedan od najznačajnijih elemenata u razvoju ovakvih sistema predstavlja memristor. Posebna osobina memristora ogleda se u sposobnosti zadržavanja informacije o prethodnom električnom stanju kroz promenu otpornosti i nakon uklanjanja spoljašnjeg napajanja, čineći ih pogodnim za realizaciju stabilnih (eng. *nonvolatile*) memorijskih uređaja i neuromorfnih sistema, za razliku od klasične RAM memorije (eng. *random access memory*), gde je za čuvanje informacije potrebno stalno napajanje [1-3].

Veliki značaj memristora ogleda se i u mogućnosti realizacije različitih tipova rezistivnog prekidačkog efekta, pri čemu uređaj može prelaziti između stanja visoke i niske otpornosti pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja. Zahvaljujući mogućnosti postepenog menjanja provodnosti, memristivni uređaji omogućavaju realizaciju analognih sinaptičkih stanja i modelovanje procesa učenja u veštačkim neuronskim mrežama. Upravo ova osobina predstavlja osnovu njihove potencijalne primene u neuromorfnim sistemima i hardverskoj implementaciji modela bioloških neurona.

Posebnu pažnju u savremenim istraživanjima privlače Ag-dopirani halkogenidni materijali zbog mogućnosti ostvarivanja stabilnog rezistivnog prekidačkog efekta (eng. *nonvolatile resistive switching*) i njihove potencijalne primene u memorijskim i neuromorfnim sistemima. Mehanizmi rezistivnog prekidačkog efekta se u ovim materijalima često povezuju sa procesima koji se odvijaju unutar aktivnog sloja pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja. Zahvaljujući mogućnosti ispoljavanja rezistivnog prekidačkog efekta, memristori na bazi materijala iz Ag–As–S–Se sistema predstavljaju značajne kandidate za razvoj stabilnih memorija, ali i za potencijalnu primenu u neuromorfnim sistemima [4].

U ovom radu ispitana je potencijalna primena memristivne strukture Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag u određivanju sinaptičke plastičnosti. U prvom delu rada su najpre analizirane njegove memristivne osobine koje su ispitivane merenjem strujno-naponske karakteristike na sobnoj temperaturi. Realizovana Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag struktura ispoljila je dobre memristivne osobine kao što su bipolarni rezistivni prekidački efekat i analognu memorijsku karakteristiku. Ovakva memristivna svojstva ukazuju na njegovu potencijalnu primenu u

određivanju sinaptičke plastičnosti. U drugom delu rada analizirane su eksperimentalno izmerene strujno-naponske karakteristike memristivne strukture pri različitim brzinama promene napona u jedinici vremena (eng. sweep rate). Rezultati ispitivanja su pokazali da jačina sinaptičke plastičnosti kod realizovane memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ raste sa povećanjem brzine promene napona u jedinici vremena, sugerišući na jačanje veze između dva veštačka neurona.

2. Memristor

Memristor predstavlja nelinearnu dvoprístupnu električnu komponentu sa svojstvom memorije i smatra se četvrtom osnovnom pasivnom komponentom teorije električnih kola, pored otpornika, kondenzatora i induktora. Njihovu teorijsku osnovu postavio je Leon Čua (eng. Leon O. Chua) 1971. godine, dok je njihova fizička realizacija ostvarena tek 2008. godine u istraživanjima kompanije Hjulet-Pakard (eng. Hewlett-Packard, HP). U svojim istraživanjima, Čua je došao do zaključka da je to komponenta koja može da menja svoj otpor u zavisnosti od količine naelektrisanja koje protekne kroz njega, odnosno da je to u stvari otpornik sa memorijom i u skladu s tim ga je nazvao memristor (eng. memory resistor). Od tada memristori postaju predmet intenzivnih istraživanja, prvenstveno zbog svojih povoljnih karakteristika, kao što su jednostavna struktura, velika brzina rada i mala potrošnja energije [1,3].

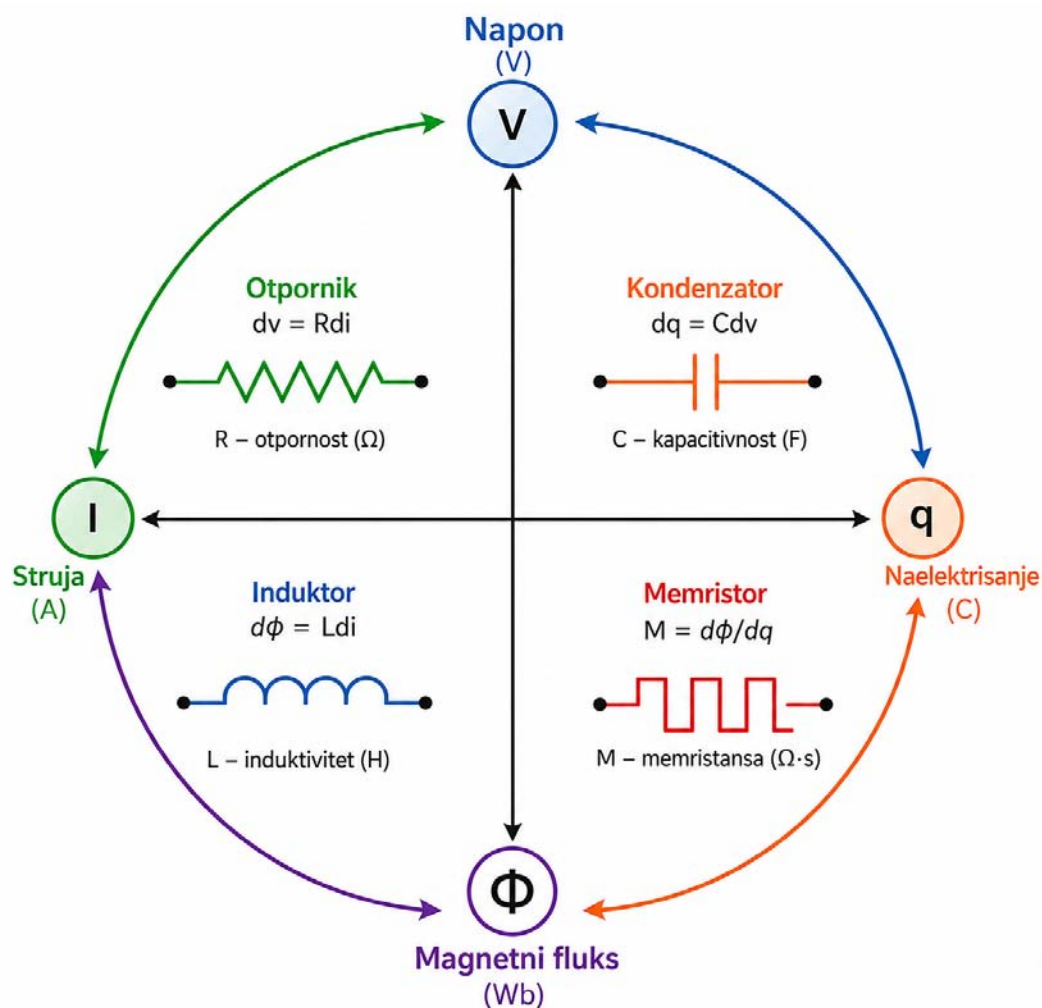
Osnovna specifičnost memristora ogleda se u njihovoj sposobnosti da „pamte“ istoriju protoka struje ili napona, odnosno da informaciju čuvaju u stanju svoje otpornosti. Ovo svojstvo omogućava njihovu primenu u skladištenju podataka, realizaciji logičkih funkcija i razvoju neuromorfnih sistema u kojima se memristori koriste za emuliranje funkcija bioloških neurona i sinapsi. Zahvaljujući savremenim tehnološkim postupcima u dobijanju različitih tipova memristivnih materijala, kao i fabrikovanju memristivnih uređaja različitim fizičkim i hemijskim metodama dodatno se proširuje njihova primena posebno u razvoju veštačkih inteligentnih sistema [5]. Memristori se smatraju ključnim za razvoj neuromorfnog računarstva odnosno računarskih sistema koji su inspirisani biološkim nervnim sistemom koji pokazuje mnogo bolje performanse od konvencionalnih računarskih sistema zasnovanim na Fon Nojmanovoj arhitekturi.

Osim toga, zbog mogućnosti integracije u visoko paralelne arhitekture i realizacije sistema inspirisanih radom biološkog mozga, memristori se danas smatraju jednim od ključnih elemenata budućih inteligentnih računarskih sistema [1,2].

2.1. Teorijske postavke

Memristor je definisan kao element koji uspostavlja vezu između naelektrisanja q i magnetnog fluksa Φ , čime se uvodi nova veličina — memristansa M . Na slici 1. prikazan je odnos između četiri osnovne električne veličine: napona (v), struje (i), naelektrisanja (q) i magnetnog fluksa (Φ), kao i odgovarajućih pasivnih elemenata koji povezuju ove veličine. Otpornik (R) uspostavlja vezu između napona i struje prema Omovom zakonu, kondenzator (C) povezuje napon i naelektrisanje, dok induktor (L) povezuje struju i magnetni fluks. Memristor (M), kao četvrti fundamentalni pasivni element, uspostavlja vezu između naelektrisanja i magnetnog fluksa. Na dijagramu su prikazane i diferencijalne relacije koje opisuju ponašanje svakog elementa. Ovakav prikaz jasno pokazuje da memristor upotpunjuje skup osnovnih pasivnih elemenata električnih kola, čime se zatvara matematička veza između sve četiri fundamentalne električne veličine [6]. Za razliku od otpornika, kondenzatora i induktora, kod kojih su odnosi između osnovnih električnih veličina linearni, memristor pokazuje nelinearno i istorijski zavisno ponašanje. Njegovo trenutno

stanje zavisi od ukupne količine naelektrisanja koje je prošlo kroz uređaj tokom vremena, zbog čega memristor poseduje svojstvo memorije [3].



Slika 1. Veze između četiri osnovne električne veličine: struje i , fluksa Φ , naelektrisanja q , i napona v i četiri fundamentalna pasivna elementa teorije električnih kola [6].

Osnovna relacija koja opisuje memristor ima oblik Omovog zakona:

$$v = M(q)i, \quad (1)$$

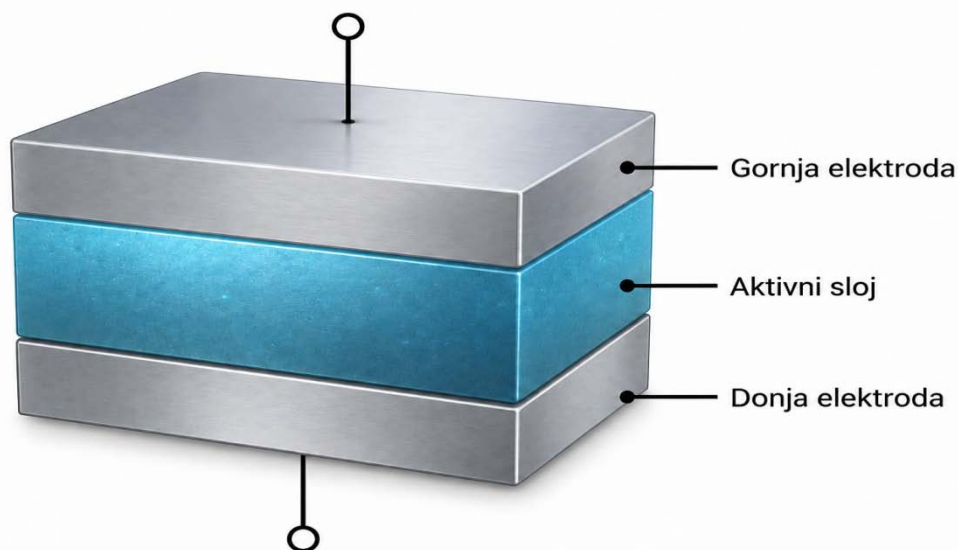
gde je $M(q)$ memristansa, koja zavisi od ukupnog naelektrisanja q koje je prošlo kroz uređaj, i je intenzitet struje a v napon na memristoru.

Memristansa predstavlja brzinu promene magnetnog fluksa u zavisnosti od opsega promene naelektrisanja:

$$M(q) = d\Phi/dq \quad (2)$$

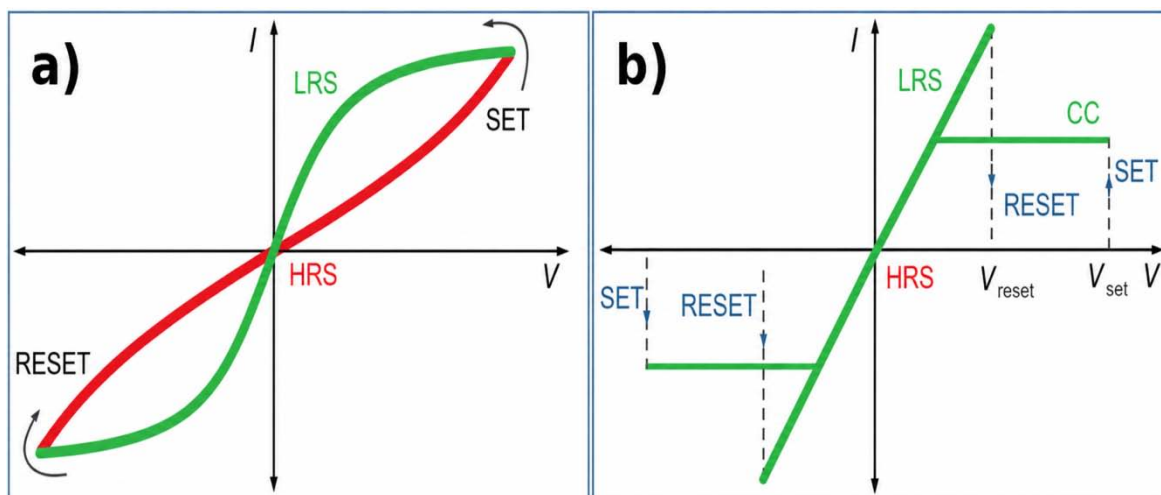
2.2. Osobine memristora

Tipičan memristor se sastoji iz aktivnog sloja koji je umetnut između dve metalne elektrode. Ovakva konfiguracija poznata je kao MIM (eng. Metal–Insulator–Metal) struktura. Aktivni sloj memristora je od izuzetnog značaja obzirom da se u njemu odvija fenomen poznat kao rezistivni prekidački efekat koji ima ključnu ulogu u performansama same memristivne komponente. Aktivni sloj memristora može biti izrađen od različitih materijala, kao što su oksidi metala, halkogenidna stakla, organski materijali itd [1]. Šematski prikaz memristora dat je na slici 2.



Slika 2. Šematski prikaz memristivne komponente.

Jedna od najznačajnijih osobina memristivnih uređaja jeste njegova strujno-naponska (I - V) karakteristika koja se može dobiti eksperimentalnim putem primenom postperiodičnog napona sinusnog oblika na ispitivani materijal. Kao rezultat toga dobija se uštinuta histerezisna petlja (slika 3a). Kada je vrednost napona nula i vrednost struje je tada nula. Sa postepenim povećanjem vrednosti napona i vrednost struje postepeno raste u skladu sa nelinearnošću memristora. Prilikom dostizanja maksimalne vrednosti napona i potom njegovog opadanja, struja će i dalje kratko da raste zbog postepenog smanjenja otpornosti u materijalu. Nakon toga dolazi i do smanjenja struje koja prati smanjenje napona. Tada deo krive koji opada formira drugačiju putanju od one koju je formirala kriva pri postepenom rastu napona, od nule do njegove maksimalne vrednosti, rezultujući uštinutom histerezisnom petljom u prvom kvadrantu. Usled promene polariteta primenjenog napona pojavljuje se histerezisna petlja i u trećem kvadrantu. Sam oblik strujno-naponske karakteristike menjaće se sa promenom primenjenog napona. Prema teoriji sa povećanjem frekvencije primenjenog napona oblik I - V krive će se sužavati, idući ka beskonačnosti kriva će poprimiti oblik prave linije odnosno, memristor će se ponašati kao idealan otpornik.



Slika 3. Strujno-naponske karakteristike različitih tipova rezistivnog prekidačkog efekta kod memristivnih komponenti: (a) bipolarni prekidački efekat, (b) unipolarni prekidački efekat [1].

Rezistivni prekidački efekat predstavlja jedan od fizičkih mehanizama koji se odvijaju u memristivnim uređajima i zasniva se na reverzibilnoj promeni otpornosti između stanja visoke otpornosti – HRS (eng. High Resistance State) i stanja niske otpornosti – LRS (eng. Low Resistance State) pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja. Prelaz iz HRS u LRS stanje označava se kao SET proces i odgovara procesu upisa informacije, dok prelaz iz LRS u HRS stanje predstavlja RESET proces, odnosno brisanje memorijskog stanja uređaja [1].

U zavisnosti od polariteta primenjenog napona i struje, rezistivni prekidački efekat može biti unipolarni ili bipolaran. Kao što je prikazano na slici 3b, unipolarni prekidački efekat ostvaruje se pri istom polaritetu napona, dok bipolarni prekidački efekat (slika 3a) zahteva promenu polariteta radi prelaska između provodnih stanja. S druge strane, u zavisnosti od same dinamike prekidačkog efekta memristor može da ispolji digitalnu ili analognu memorijsku karakteristiku. Digitalni tip memorijske karakteristike karakterišu nagle promene otpornosti između dva različita stanja otpora (slika 3b), dok se kod analognog tipa ta promena odvija postepeno i kontinuirano (slika 3a). Upravo zbog mogućnosti realizacije više provodnih nivoa analogni memristivni sistemi imaju poseban značaj u neuromorfnim sistemima pri modelovanju sinaptičke plastičnosti [1].

Memorijski prozor predstavlja još jednu važnu osobinu memristivnih uređaja i definiše se kao odnos otpora između stanja visoke otpornosti (R_{OFF}) i stanja niske otpornosti (R_{ON}). Njegova veličina određuje sposobnost uređaja da pouzdano skladišti podatke, razlikuje i programira različite digitalne ili analogne nivoe. Pored postojanja memorijskog prozora od značaja je napomenuti da se memristivni uređaji odlikuju i malom potrošnjom energije, velikom gustinom integracije, dobrom skalabilnošću, velikom brzinom zapisa, realizacijom više provodnih stanja, kompatibilnošću sa CMOS tehnologijom, kao i mogućnošću svođenja na nanometarske dimenzije. Zahvaljujući ovim osobinama memristori danas predstavljaju jedne od najperspektivnijih kandidata za razvoj stabilnih memorijskih sistema koji nalaze primenu u neuromorfnim arhitekturama koje funkcionalno oponašaju rad bioloških neuronskih mreža [1,3].

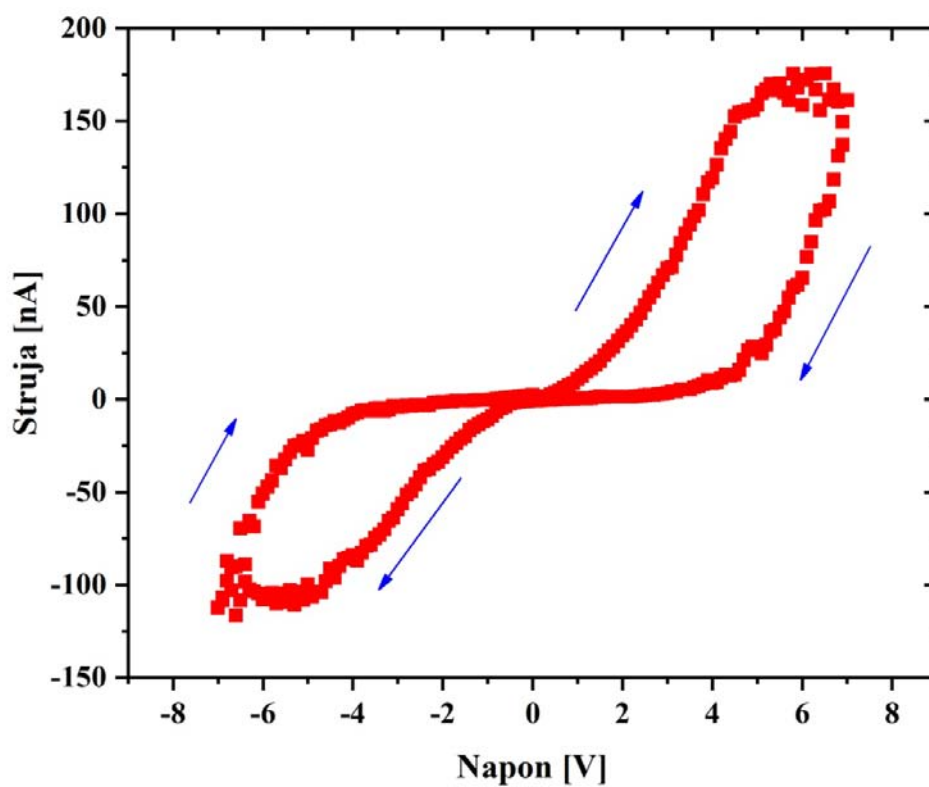
2.3. Memristor na bazi halkogenida iz Ag-As-S-Se sistema

Halkogenidni materijali predstavljaju značajnu grupu amorfni poluprovodničkih materijala koji u svom sastavu sadrže elemente VI grupe periodnog sistema, najčešće sumpor (S), selen (Se) ili telur (Te). Zbog specifične atomske strukture, velike koncentracije lokalizovanih stanja i izražene osetljivosti na spoljašnje električno polje, halkogenidni materijali pokazuju povoljne osobine za primenu u neuromorfnim sistemima. Posebno značajnu grupu čine halkogenidna stakla iz Ag-As-S-Se sistema dopirana srebrom koja ispoljavaju rezistivni prekidački efekat [4].

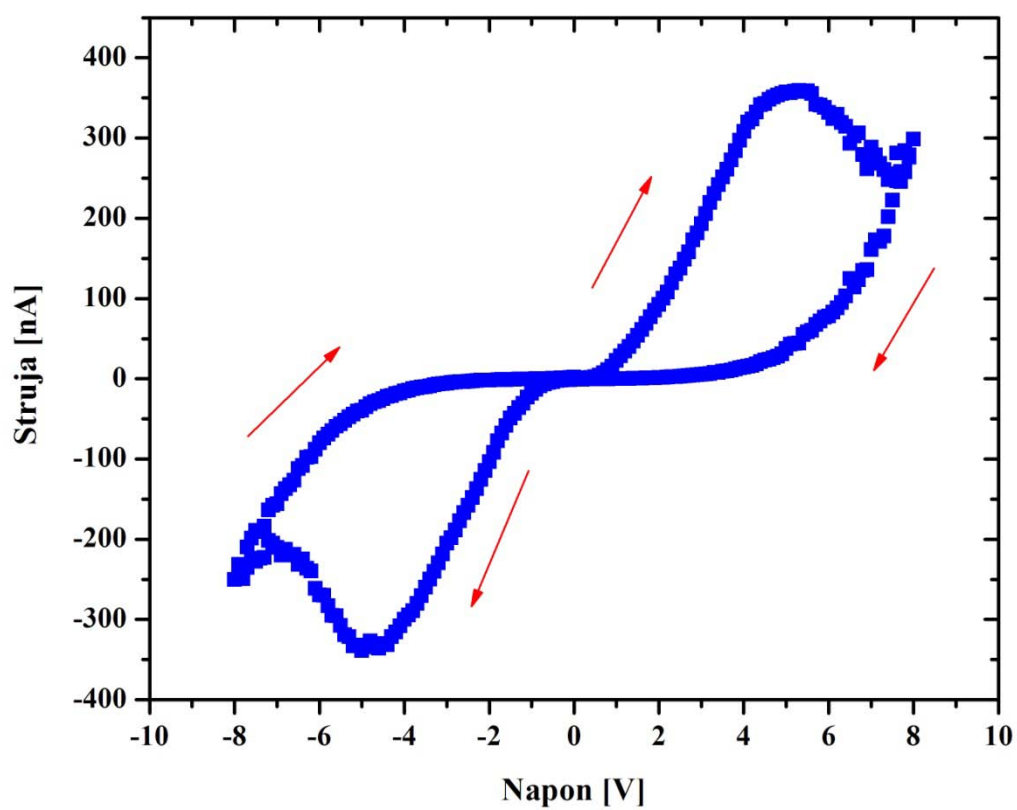
U ovom delu rada ispitane su memristivne osobine Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag memristora za potencijalnu primenu u neuromorfnim sistemima. Kao aktivni sloj memristivne strukture korišćen je materijal na bazi halkogenida dopiran srebrom iz sistema Ag_x(As₄₀S₃₀Se₃₀)_{100-x} sa udelom srebra od $x = 9$ at. %. Sinteza halkogenidnog materijala Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁ je izvršena metodom kaskadnog zagrevanja [7] prema formiranom temperaturnom dijagramu sinteze na kojoj su projektovane i definisane brzine zagrevanja, dužine trajanja i broj platoa u tačno definisanom vremenskom intervalu što je od izuzetnog značaja obzirom da mogu značajno da utiču na kvalitet dobijenog stakla [8]. Ispitivan materijal je pripremljen u obliku planparalelne ploče na čije površine su nanešene metalne elektrode.

Merenje strujno-naponske karakteristike memristivne strukture Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag je urađeno na sobnoj temperaturi pomoću računarom kontrolisanog uređaja Source Meter Keithley 2410. Softverom koji je realizovan u programskom paketu LabVIEW vršeno je generisanje pobudnog naponskog signala, kao i prikupljanje izmerenih podataka. Eksperimentalna merenja I - V karakteristike su izvršena pri naponima od ± 7 V i ± 8 V, gde je napon generisan sledećim redosledom $0 \text{ V} \rightarrow +7 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow -7 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$, kao i $0 \text{ V} \rightarrow +8 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow -8 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$, sa korakom 0.1 V. Dobijene strujno-naponske karakteristike ispitivane memristivne strukture Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag su prikazane na slikama 4. i 5. Kao što se sa slika može videti strujno-naponski odzivi ispitivanog materijala imaju oblik uštinute histerezisne petlje ukazujući da ispitivana memristivna struktura ispoljava bipolarni rezistivni prekidački efekat sa uočljivim prelazima između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja pri promeni polariteta napona.

Osim toga takođe se može zapaziti da eksperimentalno dobijene histerezisne petlje imaju analognu memorijsku karakteristiku. Na početku merenja materijal je u stanju visoke otpornosti, pri primeni napona od $0 \text{ V} \rightarrow 7 \text{ V}$ (8 V) struja se postepeno povećava i dostiže maksimalnu vrednost negde oko 6,5 V (5,3 V) gde se odvija prelaz iz visokootpornog u niskootporno stanje, odnosno SET proces. Nakon toga, pri promeni polariteta napona $0 \text{ V} \rightarrow -7 \text{ V}$ (-8 V) struja opada i dostiže minimalnu vrednost oko -5,3 V (-4,6V) gde nastaje prelaz iz niskootpornog u visokootporno stanje, poznato kao RESET proces. Takođe, na slikama 4. i 5. su strelicama označeni smerovi kretanja petlji, koji su u oba slučaja, u smeru kretanja kazaljke na satu. U literaturi ovakav smer poznat je kao CWS smer (eng. clockwise switching) što sugeriše da se u aktivnom sloju ispitivane memristivne strukture odvija filamentarni rezistivni prekidački efekat [4, 9,10].

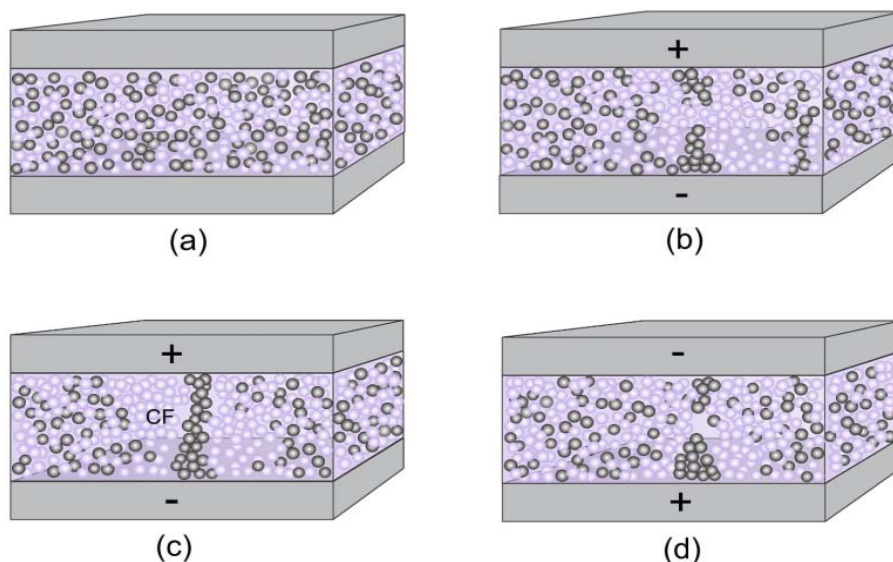


Slika 4. Strujno-naponska karakteristika memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri primenjenom naponu od $\pm 7\text{V}$.



Slika 5. Strujno-naponska karakteristika memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri primenjenom naponu od $\pm 8\text{V}$.

Filamentarni rezistivni prekidački efekat se može objasniti kao formiranje i razgradnja provodnih filamenata između gornje i donje elektrode u materijalu. Na slici 6. dat je ilustrativan prikaz procesa filamentarnog rezistivnog prekidačkog efekta u memristivnoj strukturi na bazi halkogenida iz Ag-As-S-Se sistema. Kao što je na slici prikazano može se opisati kroz četiri karakteristične faze: početno stanje bez filamena (a), formiranje filamena (b), potpuno formiran filament u LRS stanju (c) i prekid filamena tokom RESET procesa (d) [4]. Početno stanje ispitivane memristivne strukture nalazi se u visokootpornom stanju (HRS) i provodni filamenti nisu formirani, kao što je prikazano na slici 6a. Pri primeni pozitivnog napona (slika 6b) na Ag elektrode dolazi do migracije Ag jona i formiranje provodnog filamena. Naime, pod dejstvom električnog polja joni srebra u materijalu počinju da se kreću formirajući provodne filamente (eng. conductive filaments, CF) između elektroda unutar aktivnog sloja što dovodi do postepenog smanjenja otpornosti memristivne strukture. Kada napon dostigne određenu vrednost i kada filament postane dovoljno razvijen da ostvari provodni put između elektroda, otpornost je minimalna i ispitivana memristivna struktura prelazi iz HRS u LRS stanje (ON stanje), što odgovara SET procesu (slika 6c). Može se reći da se provodni filamenti ponašaju kao nekakav most koji spaja gornju i donju elektrodu, smanjujući otpornost materijala. Promena polariteta napona (slika 6d) izaziva RESET proces, odnosno materijal prelazi iz LRS u HRS stanje tokom kojeg dolazi do degradacije i prekida provodnog filamena (slika 6d). Prekid provodnog filamena je praćen povećanjem otpornosti materijala. Ovako opisan proces sa slike 6 može se ponoviti mnogo puta [4]. U izvedenim studijama [11,12] poznato je da prisustvo jona metala je od izuzetne važnosti pri odvijanju prekidačkog efekta i formiranju provodnog filamena. Memristivne osobine $\text{Ag}/\text{Ag}_{10}(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{90}/\text{Ag}$ mogle bi se pripisati provodnom filamentu kojeg čine jona srebra, ali su detaljnija istraživanja pri donošenju ovakvih zaključaka neophodna.



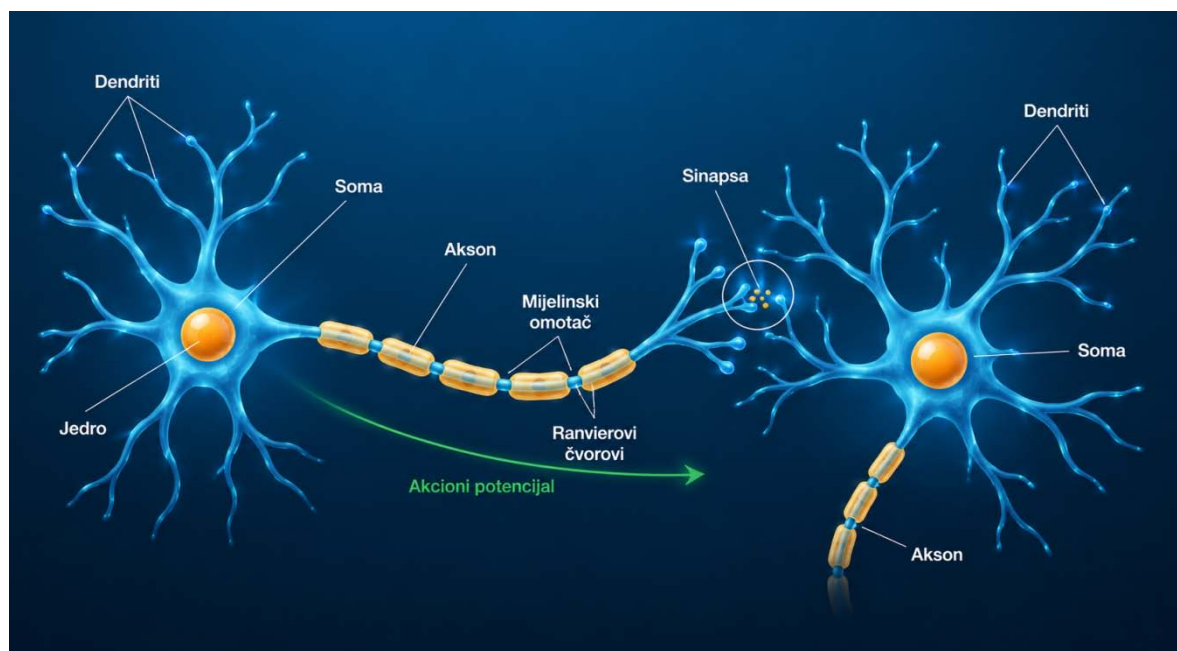
Slika 6. Ilustracija procesa rezistivnog prekidačkog efekta u $\text{Ag}/\text{Ag}_{10}(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{90}/\text{Ag}$ memristivnoj strukturi: (a) početno stanje; (b) formiranje provodnog filamena; (c) LRS stanje sa formiranim provodnim filamentom; (d) HRS stanje sa prekinutim provodnim filamentom [4].

Fitovanjem linearnog dela I - V karakteristike sa slika 4. i 5. određene su vrednosti otpora u visokootpornom stanju R_{OFF} i u niskootpornom stanju R_{ON} , gde su dobijene vrednosti za $R_{OFF} = 9.695 \cdot 10^8 \Omega$ i $R_{ON} = 1.282 \cdot 10^7 \Omega$ pri naponu od 8 V, dok je pri naponu od 7 V dobijeno da je $R_{OFF} = 9.128 \cdot 10^8 \Omega$, odnosno $R_{ON} = 3.055 \cdot 10^7 \Omega$. Na osnovu toga procenjene vrednosti odnosa R_{OFF}/R_{ON} ispitivane Ag/Ag₉(As₄₀S₃₀Se₃₀)₉₁/Ag memristivne strukture za primenjene napone od ± 8 V i ± 7 V iznose $R_{OFF}/R_{ON} \cong 76$ i $R_{OFF}/R_{ON} \cong 30$, respektivno, što predstavlja zadovoljavajuću vrednost memorijskog prozora. Takođe se može zapaziti sa grafika da je struja reda veličine nA sasvim dovoljna da bi se realizovao prelaz između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja pri promeni polariteta napona. Niske vrednosti struje doprinose manjoj potrošnji energije i većoj energetskej efikasnosti, što predstavlja poželjnu osobinu memristora koji se koristi za emulaciju bioloških sinapsi [13].

3. Struktura biološkog neurona

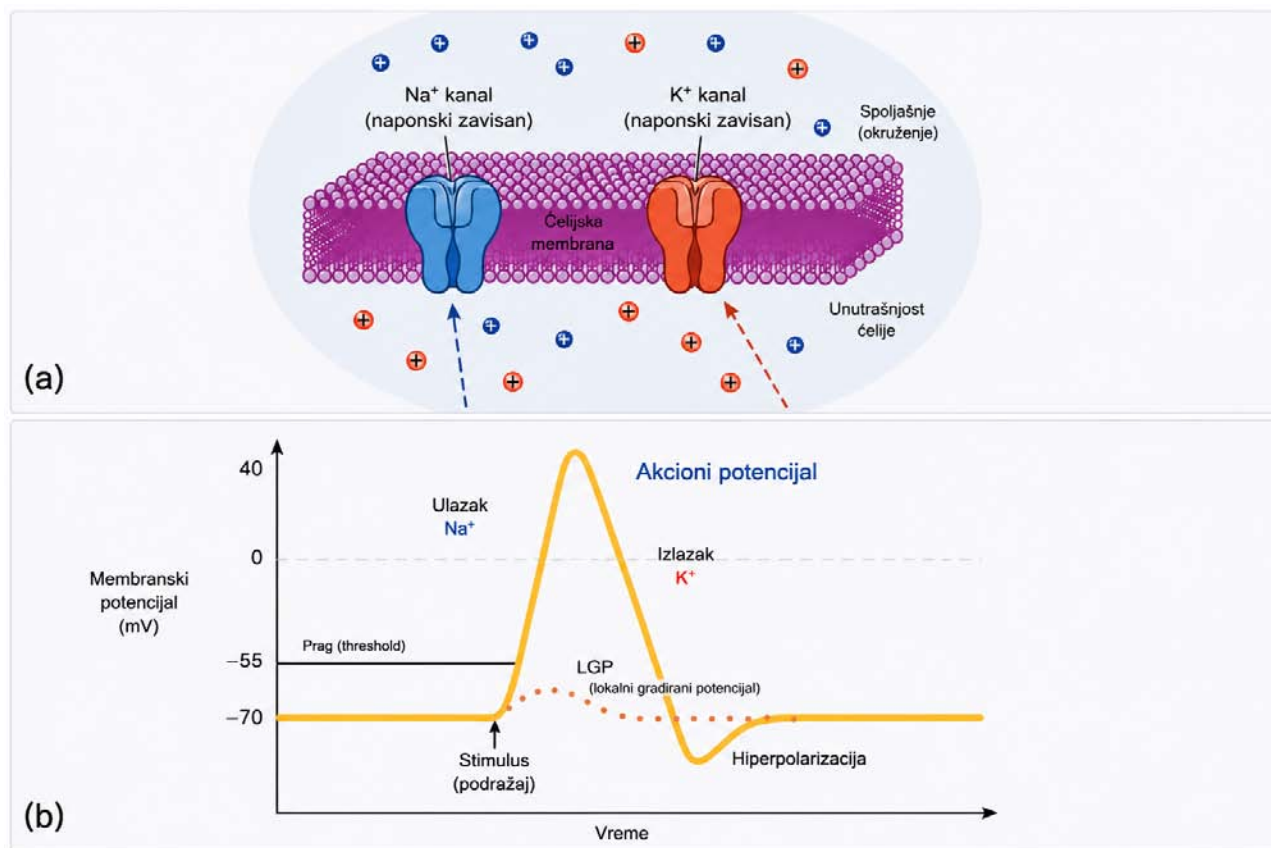
Neuroni i sinapse čine osnovne gradivne elemente biološkog nervnog sistema. Da bi se razumeo način na koji funkcionišu veštačke neuronske mreže potrebno je upoznati se sa strukturom i radom biološkog neurona. Biološki neuron predstavlja osnovnu funkcionalnu jedinicu nervnog sistema i zadužen je za prijem, obradu i prenos informacija putem električnih i hemijskih signala. Složenost nervnog sistema čoveka ogleda se u velikom broju međusobno povezanih neurona i sinapsi koji formiraju složene neuronske mreže odgovorne za procese percepcije, učenja, pamćenja i donošenja odluka. Upravo zbog velike efikasnosti bioloških neuronskih sistema u procesiranju i obradi informacija, savremeni neuromorfni računarski sistemi pokušavaju da funkcionalno oponašaju osnovne principe rada neurona i sinapsi [1].

Kao što je prikazano na slici 7, neuron se sastoji od tela ćelije (soma), dendrita i aksona, pri čemu svaki deo ima specifičnu funkciju u obradi i prenosu informacija. Dendriti predstavljaju kratke, protoplazmatične, razgranate nastavke neurona preko kojih ćelija prima signale od drugih susednih neurona. Primljeni signali prenose se ka somi, gde dolazi do njihove integracije i obrade. Ukoliko ukupni signal dostigne određenu graničnu vrednost tj. pređe vrednost praga okidanja, neuron generiše akcioni potencijal koji se prenosi duž aksona. Akson, koji se još naziva i nervno vlakno, predstavlja dugačak nastavak neurona specijalizovan za prenos električnih impulsa na veće udaljenosti. Po morfologiji razlikuju se dva tipa nervnih vlakana, ona sa mijelinskim omotačem i ona bez mijelinskog omotača. Nervno vlakno kod kojeg je akson obavijen mijelinskom ovojnicom, smanjuje gubitke signala i povećava brzinu prenosa impulsa. Između mijelinskih segmenata nalaze se Ranvierovi čvorovi, preko kojih se akcioni potencijal prenosi skokovito, čime se značajno povećava efikasnost prenosa signala kroz neuron [14].



Slika 7. Građa biološkog neurona i prenos signala preko sinapse [15].

Ćelijska membrana (slika 8a) je selektivno propustljiva i razdvaja unutrašnjost nervne ćelije od ekstracelularne tečnosti. Intracelularna i ekstracelularna tečnost ispunjene su jonima natrijuma, kalijuma, kalcijuma, hlora itd. Spoljašnja strana ćelijske membrane ima veću koncentraciju jona Na^+ , dok unutrašnja strana ćelijske membrane (intracelularna tečnost) ima veću koncentraciju jona kalijuma K^+ [1,14].



Slika 8. (a) Šematski prikaz ćelijske membrane neurona. (b) Akcioni potencijal u biološkom neuronu [1].

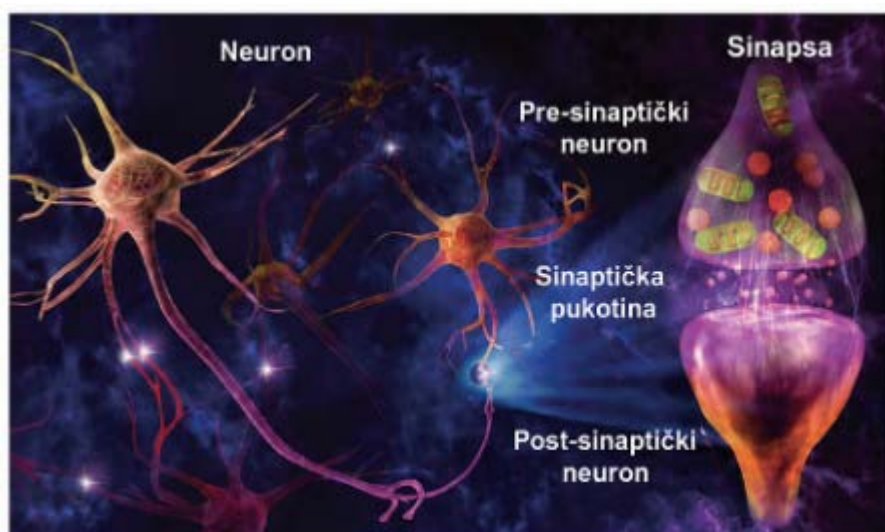
Nadražaji se u nervnoj ćeliji prenose preko promena u membranskom potencijalu, odnosno razlika električnog potencijala između unutrašnje i spoljašnje strane ćelijske membrane. Membranski potencijal nastaje kao posledica neravnomerne raspodele jona sa obe strane ćelijske membrane i njene selektivne propustljivosti za različite vrste jona. U stanju mirovanja membranski potencijal neurona iznosi približno -70 mV. Ovo stanje održava se prvenstveno zahvaljujući većoj propustljivosti membrane za K^+ jone u odnosu na Na^+ jone, kao i radu natrijum-kalijumske pumpe. Kada neuron primi dovoljno jak spoljašnji stimulus, čiji intenzitet prelazi prag nadražaja, dolazi do depolarizacije membrane i otvaranja naponski zavisnih Na^+ kanala (slika 8a). Ulazak Na^+ jona u ćeliju izaziva nagli porast membranskog potencijala i generisanje akcionog potencijala, što je prikazano na slici 8b. Nakon toga dolazi do zatvaranja Na^+ kanala i aktivacije K^+ kanala, pri čemu K^+ joni izlaze iz ćelije i membranski potencijal se vraća na početnu vrednost. Ovakve promene membranskog potencijala omogućavaju nastanak i širenje nervnog impulsa kroz neuron. Ukoliko se desi da spoljašnji stimulus nije dovoljno jakog intenziteta, odnosno ne dostiže vrednost praga okidanja, tada se otvara samo određen broj kanala za jone natrijuma što nije dovoljno da izazove

generisanje akcionog potencijala. U tom slučaju reakcija je lokalnog karaktera i membrana se vraća u stanje mirovanja. Osim toga, nakon generisanja akcionog potencijala neuron ulazi u refraktorni period, vremenski interval u toku kojeg neuron ne može da odgovori na nov stimulus i generiše akcioni potencijal. Po završetku ovog perioda neuron ponovo postaje sposoban da odreaguje na nov nadražaj [1].

4. Sinapsa

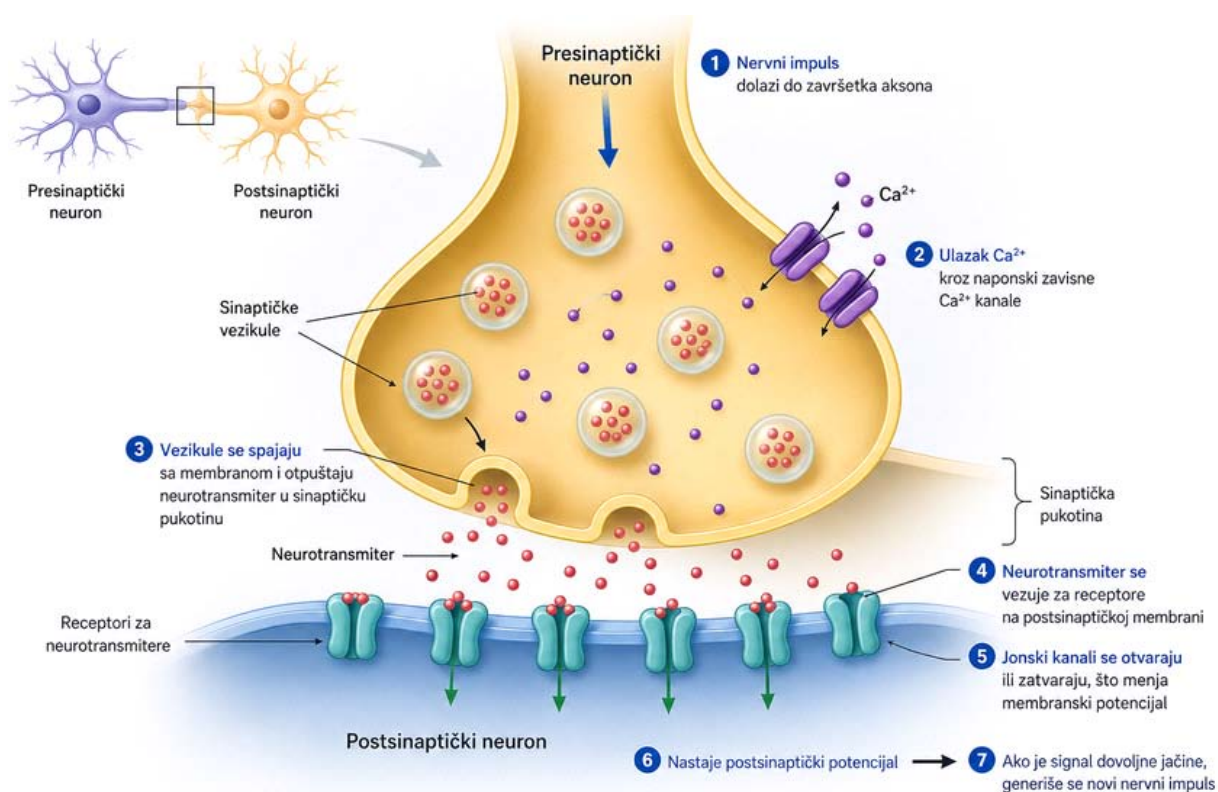
Sinapsa predstavlja funkcionalnu vezu između dva neurona preko kojeg se prenose informacije u nervnom sistemu. Upravo sinapse omogućavaju međusobnu komunikaciju neurona i imaju ključnu ulogu u procesima učenja, memorisanja i adaptacije bioloških neuronskih mreža. Kao što je prikazano na slici 9. sinapsa se sastoji od:

- presinaptičkog neurona,
- sinaptičke pukotine,
- i postsinaptičkog neurona.



Slika 9. Ilustracija bioloških neurona i formirane sinapse [2].

Prenos informacija između neurona može se ostvariti preko električnih ili hemijskih sinapsi. Električne sinapse omogućavaju direktan prolazak jona između susednih neurona putem specijalizovanih međucelijskih veza, dok se kod hemijskih sinapsi signal prenosi oslobađanjem neurotransmitera u sinaptičku pukotinu. Hemijske sinapse predstavljaju dominantan mehanizam komunikacije u nervnom sistemu čoveka [16]. Proces prenosa signala kroz hemijsku sinapsu prikazan je na slici 10. Kada akcioni potencijal stigne do presinaptičkog terminala dolazi do otvaranja naponski zavisnih Ca^{2+} kanala. Ulazak Ca^{2+} jona izaziva oslobađanje neurotransmitera iz sinaptičkih vezikula u sinaptičku pukotinu. Neurotransmiteri zatim difunduju kroz sinaptičku pukotinu i vezuju se za receptore na postsinaptičkoj membrani, što dovodi do promene membranskog potencijala postsinaptičkog neurona odnosno do postsinaptičkog događaja [1].

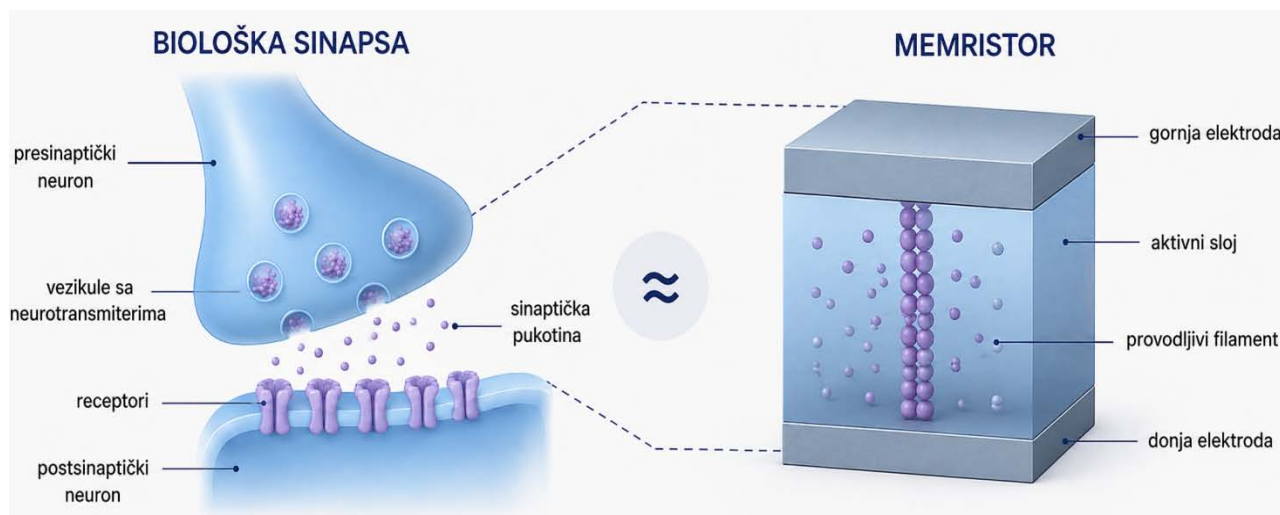


Slika 10. Ilustracija sinapse između dva neurona [1].

Prenos signala kroz sinapsu predstavlja veoma složen elektrohemijski proces koji uključuje kretanje jona kroz ćelijsku membranu, oslobađanje neurotransmitera i aktivaciju postsinaptičkih receptora. Efikasnost prenosa signala zavisi od količine oslobođenih neurotransmitera, gustine receptora i intenziteta prethodne neuronske aktivnosti. Upravo zbog toga sinapse imaju sposobnost prilagođavanja i promene jačine prenosa signala tokom vremena [1,2].

4.1. Sinaptička plastičnost

Sinaptička plastičnost, poznata još i kao sinaptička težina, predstavlja jačinu veze između dva neurona i određuje efikasnost prenosa signala kroz sinapsu. U biološkim sistemima sinaptička težina nije konstantna veličina već zavisi od prethodne aktivnosti presinaptičkog i postsinaptičkog neurona. Sinaptička težina može da jača ili slabi u zavisnosti od stepena otpuštanja neurotransmitera kroz sinaptičku pukotinu od strane akcionog potencijala. Jačanje sinaptičke težine dovodi do efikasnijeg prenosa signala između neurona, dok njeno smanjenje slabi sinaptičku vezu. Prilagođavanje jačine sinaptičkih veza, odnosno njihova sposobnost da menjaju svoju jačinu i efikasnost na osnovu prethodnih aktivnosti, smatra se osnovnim mehanizmom procesa učenja i pamćenja u biološkim neuronskim mrežama [1]. Dok se provodnost biološke sinapse menja usled složenih elektrohemijskih procesa, analogno tome kod memristora se promena provodnosti realizuje usled formiranja ili razgradnje provodnog filameta [1,9]. Analogija između biološke sinapse i memristora prikazana je na slici 11.



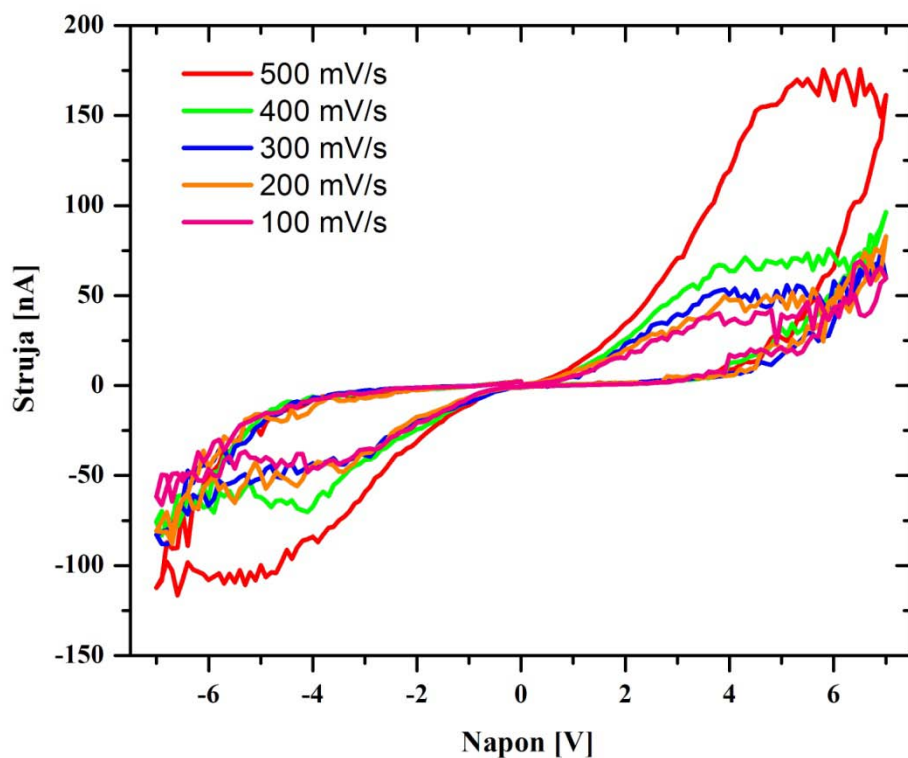
Slika 11. Analogija između biološke sinapse i memristora.

4.2. Određivanje sinaptičke plastičnosti

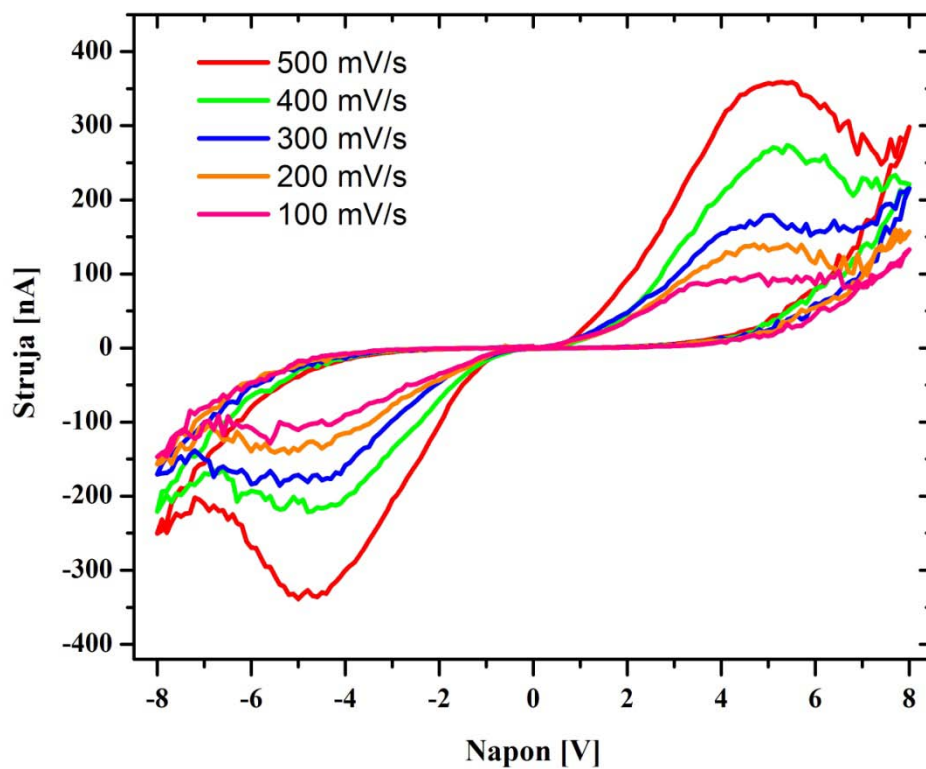
U ovom delu rada ispitana je sinaptička plastičnost realizovanog memristora $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$. Naime, memristivna struktura $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ se može posmatrati kao veštačka sinapsa koja pokazuje sličnost sa biološkom sinapsom. U ovom slučaju gornja i donja Ag elektroda predstavljaju presinaptički i postsinaptički neuron, dok aktivni sloj memristora $\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}$ oponaša sinaptičku pukotinu.

U cilju određivanja sinaptičke plastičnosti urađena su eksperimentalna merenja I - V karakteristike na sobnoj temperaturi, sa naponima od $\pm 7 \text{ V}$ i $\pm 8 \text{ V}$, pri različitim sweep rate vrednostima. Sweep rate predstavlja brzinu promene primenjenog napona u jedinici vremena i izražava se u mV/s . Tokom merenja napon je generisan sledećim redosledom: $0 \text{ V} \rightarrow +7 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow -7 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$, kao i $0 \text{ V} \rightarrow +8 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow -8 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$, dok su vrednosti za sweep rate bile sledeće: 100 mV/s , 200 mV/s , 300 mV/s , 400 mV/s , i 500 mV/s .

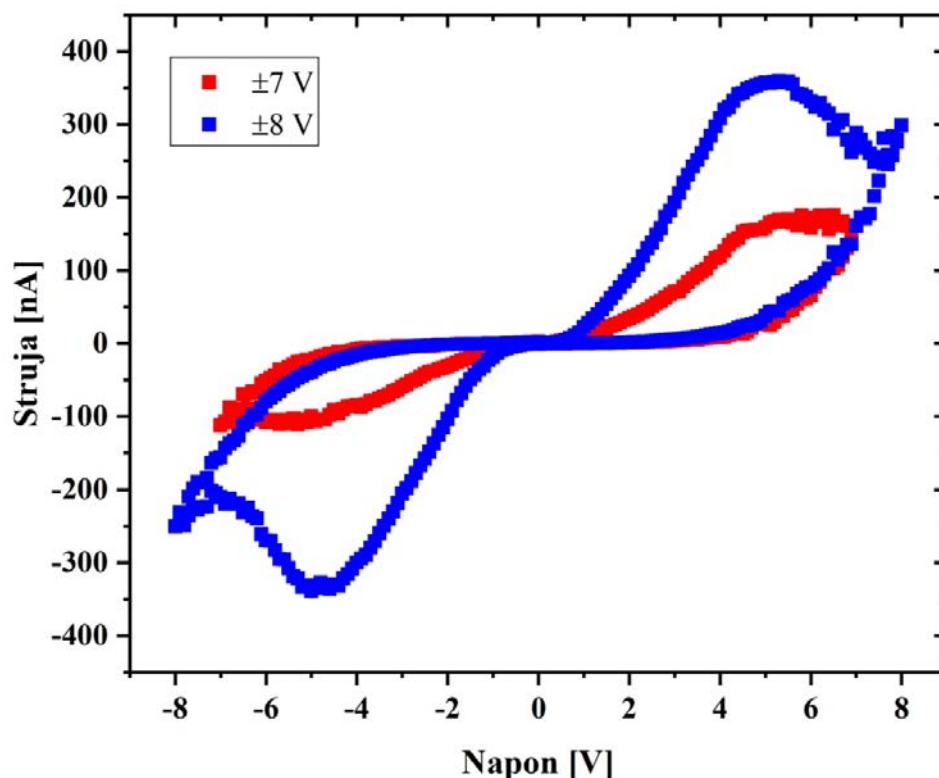
Na slikama 12. i 13. prikazane su eksperimentalno dobijene I - V karakteristike memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri izmerenim naponima od $\pm 7 \text{ V}$ i $\pm 8 \text{ V}$ za različite sweep rate vrednosti, respektivno. Sa slika se može uočiti da eksperimentalno dobijeni I - V odzivi ispoljavaju analogan oblik histerezisne petlje sa uočljivim prelazima između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja pri promeni polariteta napona. Takođe se može zapaziti da promena sweep rate-a utiče na vrednost struje koja ima tendenciju rasta sa porastom sweep rate vrednosti. Osim toga jasno je izražen i porast struje pri najvišem izmerenom naponu u poređenju sa rezultatima dobijenim pri $\pm 7 \text{ V}$ (Slika 14.).



Slika 12. I - V karakteristike memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri izmerenom naponu od ± 7 V za različite sweep rate vrednosti u opsegu od 100 mV/s - 500 mV/s.

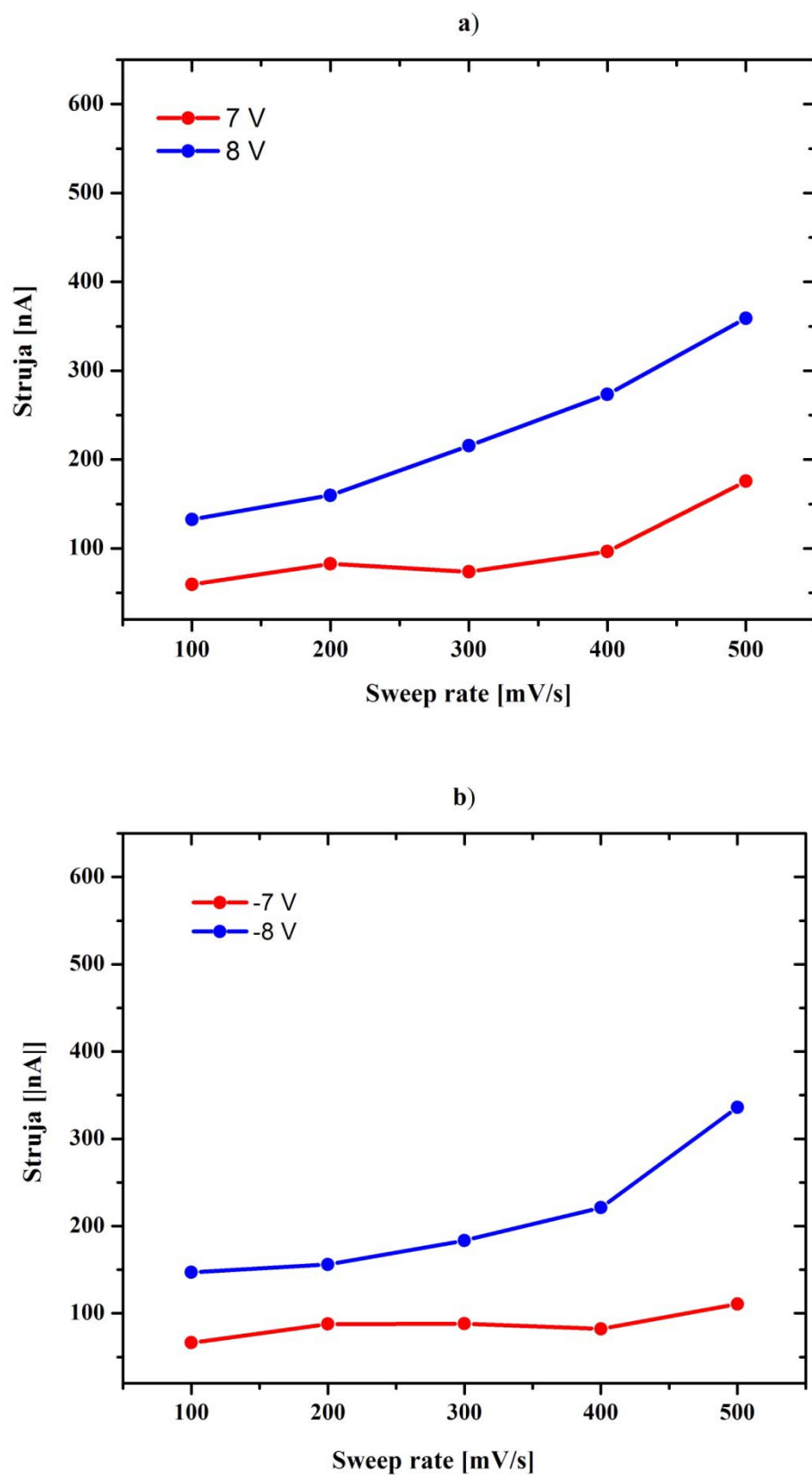


Slika 13. I - V karakteristike memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri izmerenom naponu od ± 8 V za različite sweep rate vrednosti u opsegu od 100 mV/s - 500 mV/s



Slika 14. Uporedni prikaz I-V odziva memristivne strukture $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri različitim izmerenim naponima.

Izmerene I-V krive prezentovane na slikama 12. i 13. poslužile se za određivanje vrednosti struja u SET i RESET stanju u pozitivnom i negativnom delu pobudnog napona. Rezultati određivanja sinaptičke plastičnosti pri pozitivnom i negativnom polaritetu primenjenog napona pobude prikazani su na slici 15. Sa slike se može videti da vrednosti struje rastu sa porastom sweep rate-a, kao i sa povećanjem napona. U oba slučaja, struja se kontinuirano menja usled promene otpora memristora kao odgovor na primenjen napon, stoga se vrednost struje može smatrati sinaptičkom plastičnošću. U literaturi je istaknuto da se struje u memristivnoj strukturi koja oponaša veštačku sinapsu mogu smatrati sinaptičkom plastičnošću [9,10]. Konkretno u ovom slučaju zapaženi porast sinaptičke plastičnosti ukazuje na jačanje veze između dva veštačka neurona realizovana korišćenjem memristora na bazi halkogenida dopiranog srebrom. Jačanje sinaptičkih veza je izuzetne važnosti jer se na njoj zasniva učenje bioloških neurona [9,10].



Slika 15. Zavisnosti sinaptičke plastičnosti od sweep rate-a za memristivnu strukturu $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ pri pozitivniom (a) i negativniom (b) polaritetu napona.

5. Zaključak

U ovom radu analizirana je mogućnost primene memristora na bazi halkogenidnog materijala u određivanju sinaptičke plastičnosti kao i njegove potencijalne primene u neuromorfnim sistemima. U tu svrhu ispitivana je memristivna struktura $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ za koju je kao aktivni sloj korišćeno staklo iz klase halkogenida dopirano srebrom.

Prvobitno su analizirane memristivne osobine ispitivane $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ strukture merenjem strujno-naponske karakteristike pri naponima pobude od $\pm 7 \text{ V}$ i $\pm 8 \text{ V}$ na sobnoj temperaturi. Dobijeni rezultati pokazali su da ispitivani memristor ispoljava bipolarni rezistivni prekidački efekat, sa jasnim prelazima između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja pri promeni polariteta pobudnog napona. Za realizaciju prelaza između R_{OFF} i R_{ON} stanja pri promeni polariteta napona bila je dovoljna struja reda veličine nA. Niske vrednosti struja predstavljaju poželjnu osobinu memristora koji se koriste za emulaciju bioloških sinapsi obzirom da doprinose manjoj potrošnji energije i većoj energetskej efikasnosti. Pored toga, izvršena je i analiza memorijskog prozora gde je fitovanjem strujno-naponskih karakteristika dobijeno da je odnos $R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}} \approx 76$ pri naponu od $\pm 8 \text{ V}$ i $R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}} \approx 30$ pri naponu od $\pm 7 \text{ V}$. Takođe, smerovi kretanja histerezisnih petlji sugerišu da se u aktivnom sloju ispitivane memristivne strukture odvija filamentarni rezistivni prekidački efekat, koji se može objasniti preko formiranja i razgradnje provodnih filamenata koji se odvijaju između gornje i donje elektrode u aktivnom sloju memristivne strukture.

Dobre memristivne karakteristike koje je proučavan memristor $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ ispoljio ukazuju na njegovu potencijalnu primenu u određivanju sinaptičke plastičnosti. U skladu tim urađena su eksperimentalna merenja I - V karakteristike na sobnoj temperaturi pri vrednostima sweep rate-a u opsegu $100 \text{ mV/s} - 500 \text{ mV/s}$, sa naponima od $\pm 7 \text{ V}$ i $\pm 8 \text{ V}$. Dobijeni rezultati pokazali su da se sa promenom sweep rate-a javlja porast sinaptičke plastičnosti ukazujući na jačanje veze između dva veštačka neurona koja je realizovana korišćenjem memristora na bazi halkogenida dopiranog srebrom.

Dobijeni eksperimentalni rezultati kao i analiza koja je sprovedena u ovom radu ukazuju da memristori na bazi halkogenida iz Ag-As-S-Se sistema dopiran srebrom predstavljaju perspektivne kandidate za realizaciju veštačkih sinapsi i razvoju neuromorfnih računarskih sistema. Njihova sposobnost postepenog menjanja provodnosti je od izuzetne važnosti jer je to odlika plastičnosti bioloških neurona i ukazuje na mogućnost primene u hardverskoj realizaciji veštačkih neuronskih mreža inspirisanih biološkim nervnim sistemom, što će biti predmet budućih istraživanja.

Literatura

- [1] Q. Wan and Y. Shi eds., *Neuromorphic Devices for Brain-Inspired Computing Artificial Intelligence, Perception, and Robotics*, Wiley-VCH GmbH, Germany, 2022.
- [2] W. Huang, X. Xia, C. Zhu, P. Steichen, W. Quan, W. Mao, J. Yang, L. Chu, X. Li, *Memristive Artificial Synapses for Neuromorphic Computing*, *Nano-Micro Lett.*, vol. 13, 85, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00618-2>
- [3] Chang Y-F, ed., *Memristors - The Fourth Fundamental Circuit Element - Theory, Device, and Applications*, IntechOpen, 2024, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110931>
- [4] K. O. Čajko, D. L. Sekulić, S. R. Lukić-Petrović, *Dielectric and bipolar resistive switching properties of Ag doped As–S–Se chalcogenide for non-volatile memory applications*, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 296, 127301, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127301>
- [5] Z. Cao, B. Sun, G. Zhou, S. Mao, S. Zhu, J. Zhang, C. Ke, Y. Zhao, J. Shao, *Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial intelligence*, *Nanoscale Horiz.*, vol. 8, (6), pp. 716–738, 2023. <https://doi.org/10.1039/d2nh00536k>
- [6] Ch. K. Volos, I. M. Kyprianidis, I. N. Stouboulos, E. Tlelo-Cuautle and S. Vaidyanathan, *Memristor: A New Concept in Synchronization of Coupled Neuromorphic Circuits*, *J. Eng. Sci. and Tech. Rev.*, 8, (2), 157 – 173, 2015, Special Issue on Synchronization and Control of Chaos: Theory, Methods and Applications.
- [7] K. O. Čajko, D. L. Sekulić, R. Yatskiv, J. Vaniš, S. R. Lukić-Petrović, *Impact of Ag concentration in As-S-Se chalcogenide on physical, topological and resistive switching properties*, *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 622, 122663, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2023.122663>
- [8] K. Čajko, *Dobijanje i karakterizacija 2D i 3D funkcionalnih materijala iz klase halkogenida dopiranih srebrom*, doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2018.
- [9] T. D. Dongale, S. V. Mohite, A. A. Bagade, R. K. Kamat, K. Y. Rajpure, *Bio-mimicking the synaptic weights, analog memory, and forgetting effect using spray deposited WO₃ memristor device*, *Microelectron. Eng.*, vol. 183–184, pp. 12–18, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.10.003>
- [10] G. U. Kamble, N. P. Shetake, S. D. Yadav, A. M. Teli, D. S. Patil, S. A. Pawar, M. M. Karanjkar, P. S. Patil, J. C. Shin, M. K. Orlowski, R. K. Kamat, T. D. Dongale, *Coexistence of filamentary and homogeneous resistive switching with memristive and meminductive memory effects in Al/MnO₂/SS thin film metal–insulator–metal device*, *Int. Nano Lett.*, vol. 8, pp. 263–275, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0249-z>
- [11] B. Zhang, P. Kutalek, P. Knotek, L. Hromadko, J.M. Macak, T. Wagner, *Investigation of the resistive switching in Ag_xAsS₂ layer by conductive AFM*, *Appl. Surf. Sci.* 382, 336–340, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.152>

- [12] V. Sousa, *Chalcogenide materials and their application to Non-Volatile Memories*, Microelectron. Eng. 88, 807–813, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.06.042>.
- [13] Z. Xia, X. Sun, Z. Wang, J. Meng, B. Jin, T. Wang, *Low-Power Memristor for Neuromorphic Computing: From Materials to Applications*, Nano-Micro Lett. 17, 217, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01705-4>
- [14] C. Mead, *Analog VLSI and Neural Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1989.
- [15] <https://rotel.pressbooks.pub/biologicalpsychology/chapter/the-structure-of-the-neuron/>
- [16] <https://www.khanacademy.org/science/biology/human-biology/neuron-nervous-system/a/the-synapse> (pristupljeno 26.06.2026)

Biografija

Atila Levai rođen je 22.03.1990. godine u Zrenjaninu. Osnovnu školu „Miloje Čiplic” pohađao je u Novom Bečeju, dok je srednju školu završio 2009. godine u Zrenjaninu, u Elektrotehničkoj i građevinskoj školi „Nikola Tesla”. Iste godine upisao je Višu elektrotehničku školu u Subotici, na smeru Telekomunikacije.



Nakon kraćeg vremena menja svoja interesovanja i usmerava ih ka geografiji i fizici, pa 2010. godine upisuje smer Fizika–meteorologija na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Od sredine 2014. godine paralelno studira i radi, a sredinom 2016. godine odlazi u Ujedinjeno Kraljevstvo zbog posla. U međuvremenu gubi status studenta.

Godine 2018. vraća se studijama na istom fakultetu, ovoga puta na smeru Fizičar, nastavljajući studije uz rad u inostranstvu. Sredinom 2022. godine zapošljava se kao nastavnik fizike u Srednjoj Školi u Novom Bečeju i Bečejskoj gimnaziji, u kojima radi do danas. Diplomirao je 2024. godine, a iste godine upisao je master akademske studije fizike, smer Fizika materijala.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 3

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska publikacija
Tip zapisa: TZ	Elektronski materijal
Vrsta rada: VR	Master rad
Autor: AU	Atila Levai
Mentor: MN	dr Kristina Čajko
Naslov rada NR	Primena memristora na bazi halkogenida u određivanju sinaptičke plastičnosti
Jezik publikacije: JP	srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	srpski/engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: YTH	Vojvodina
Godina: GO	2026
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, trg Dositeja Obradovića 3
Fizički opis rada: FO	Broj poglavlja 5/ broj strana 24/ broj literarnih navoda 16/ broj slika 8/ broj grafika 7
Naučna oblast: NO	Fizika
Naučna disciplina: ND	Fizika materijala
Predmetna odrednica/ ključne reči: PO	Memristor, halkogenidni materijali, Ag–As–S–Se sistem, rezistivni prekidački efekat, sinaptička plastičnost, neuromorfni sistemi
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Departmana za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad
Važna napomena: VN	nema
Izvod: IZ	U radu je analizirana primena memristora na bazi Ag-dopiranog halkogenidnog materijala u određivanju sinaptičke plastičnosti. Ispitivane su memristivne osobine $\text{Ag}/\text{Ag}_9(\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30})_{91}/\text{Ag}$ strukture na sobnoj temperaturi. Eksperimentalno dobijene I – V karakteristike su pokazale da ispitivani memristor ispoljava bipolarni rezistivni prekidački efekat, kao i analogan oblik histerezisne petlje sa uočljivim prelazima između visokootpornog R_{OFF} i niskootpornog R_{ON} stanja pri promeni polariteta pobudnog napona. Rezultati su takođe pokazali da se sa povećanjem sweep rate-a povećava jačina sinaptičke plastičnosti, što potvrđuje potencijal

	ispitivanog memristora za primenu u neuromorfnim sistemima.
<i>Datum prihvatanja teme:</i> DP	19.06.2026.
<i>Datum odbrane:</i> DO	17.07.2026.
<i>Članovi komisije:</i> KO	
<i>Predsednik:</i>	prof. dr Maja Stojanović, redovni profesor, Prirodno-matematički fakultet Univerzitet u Novom Sadu
<i>Član:</i>	prof. dr Dalibor Sekulić, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka Univerzitet u Novom Sadu
<i>Član, mentor:</i>	dr Kristina Čajko, naučni saradnik, Prirodno-matematički fakultet Univerzitet u Novom Sadu



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 3

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph publication
Type of record: TR	Electronic material
Content code: CC	Master Thesis
Author: AU	Atila Levai
Mentor/comentor: MN	Kristina Čajko, Phd
Title: TI	Application of chalcogenide-based memristor in determination of synaptic plasticity
Language of text: LT	Serbian (Latin)
Language of abstract: LA	Serbian/English
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2026
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Faculty of Sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3
Physical description: PD	Chapters 5 / pages 24 / references 16/ figures 8 / graphs 7
Scientific field: SF	Physics
Scientific discipline: SD	Materials physics
Subject/ Key words: SKW UC	Memristor, chalcogenide materials, Ag–As–S–Se system, resistive switching effect, synaptic plasticity, neuromorphic systems
Holding data: HD	Library of Department of Physics, Faculty of Sciences, Novi Sad
Note: N	none
Abstract: AB	The paper analyzes the application of Ag-doped chalcogenide-based memristor in determination of synaptic plasticity. The memristive properties of the Ag/Ag ₉ (As ₄₀ S ₃₀ Se ₃₀) ₉₁ /Ag structure were investigated at room temperature. The experimentally obtained <i>I</i> – <i>V</i> characteristics showed that investigated memristor exhibits a bipolar resistive switching effect, as well as analog memory with noticeable transitions between the high-resistance <i>R</i> _{OFF} and low-resistance <i>R</i> _{ON} states upon voltage polarity change. The results also showed that with an increase in the sweep rate, the strength of synaptic plasticity increases, which confirms the potential of the examined memristor for application in neuromorphic systems.

Accepted by the Scientific Board: ASB	19.06.2026.
Defended on: DE	17.07.2026.
Thesis defend board: DB	
President:	Maja Stojanović, PhD, full professor, Faculty of Sciences University of Novi Sad
Member:	Dalibor Sekulić, PhD, associate professor, Faculty of Technical Sciences University of Novi Sad
Member, supervisor:	dr Kristina Čajko, research associate, Faculty of Sciences University of Novi Sad