

VEZA ELEKTRIČNIH PARAMETARA SA KARAKTERISTIKAMA PREKIDAČKE KOMPONENTE BAZIRANE NA AMORFNOM POLUPROVODNIKU $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$

RELATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF AMORPHOUS SEMICONDUCTORS $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ WITH THE CHARACTERISTICS OF SWITCHING COMPONENTS BASED ON THIS MATERIAL

Miloš Slankamenac, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Republika Srbija
Svetlana R. Lukić, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno matematički fakultet, Novi Sad, Republika Srbija

Sadržaj - Predmet ovog rada je eksperimentalno određivanje električnih i prekidačkih parametara prekidačke komponente bazirane na visokootpornom amorfnom halkogenidnom poluprovodniku $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$. Takođe cilj je i da se odredi veza tih parametara i njihova zavisnost od temperature i frekvencije. Pokazano je da amorfni poluprovodnik iz sistema $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ poseduje relativno visoku električnu otpornost i izražen nelinearni prekidački efekat, tako da ima veliki potencijal za primene u elektronici i optoelektronici. Na prekidačke parametre realizovane komponente veliki uticaj imaju vrednosti energija aktivacije amorfne poluprovodnika, njegova provodljivost u stacionarnom i dinamičkom režimu, kao i temperatura.

Abstract - The subject of this paper is experimentally determination of the relation between electrical and temperature parameters of of amorphous semiconductors $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ with the characteristics of switching components based of this material. It is also found the relationship of these parameters with frequency. It was shown that amorphous semiconductor $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ has relatively high electrical resistance and expressed memory switching nonlinear effect, so that it has great potential for applications in electronics and optoelectronics. On switching parameters of the realized switching component a great impact have: values of the activation energy of the amorphous semiconductor, its electrical conductivity in the stationary and dynamic mode, and temperature.

1. UVOD

Sistematično i temeljno ispitivanje tehnologije dobijanja, osobina i primene novih materijala je vrlo značajna oblast savremene elektronike. Neprekidni tehnološki razvoj diktira potrebu za nalaženjem novih struktura i postavlja visoke zahteve u pogledu njihovih karakteristika. Može se reći da su nauke o materijalima i elektronika u neprekidnoj vezi i stalnoj ekspanziji jer proširuju granice primena postojećih i otkrivaju i razvijaju materijale sa novim osobinama. Time u znatnoj meri se usmerava napredak nauke i tehnologije u celini. Posebno mesto u svemu ovome zauzima istraživanje visokootpornih poluprovodničkih materijala.

Jedna od najvažnijih karakterizacija ovih materijala sa aspekta primene u elektronici obuhvata merenja električnih osobina u jednosmernom i naizmničnom režimu u zavisnosti od temperature [1]. Postoji veliki broj instrumenata i mernih metoda pomoću kojih se vrši ova karakterizacija. Impedansna spektroskopija je jedna relativno nova i moćna metoda za karakterizaciju električnih osobina materijala i komponenti [2]. Ona daje značajne elektro-fizičke i elektro-hemijske informacije o ispitivanom materijalu tokom istraživanja i veći broj parametara same realizovane komponente.

U grupi visokootpornih poluprovodničkih materijala važno mesto zauzimaju amorfni poluprovodnički halkogenidi, tj. materijali koji sadrže jedan ili više halkogenih elemenata: sumpor, selen i telur [3, 4]. To su materijali neuređene strukture, koji kada se dobijaju u masivnoj - balk (bulk, eng.) formi se nazivaju stakla, a u formi slojeva debljine reda veličine do nekoliko μm nazivaju se filmovima.

Povećan interes za izučavanjem ovih materijala datira još od sredine prošlog veka kada je otkriveno da ispoljavaju niz neobičnih i netrivialnih svojstava u poređenju sa kristalnim strukturama i koji usled toga neprestano šire sferu praktične primene [5, 6]. Po nizu svojstava ovi materijali u mnogome prevazilaze kristalne i počinju da ih zamenjuju u nekim tradicionalnim oblastima primene, pre svega u optoelektronici. Osim toga razvijaju se i nove tehnologije koje omogućavaju dobijanje postojećih amorfne i staklastih materijala, ali sa poboljšanim osobinama.

Velike prednosti ovih materijala proističu pre svega iz mogućnosti variranja bitnih fizičkih i fizičko-hemijskih parametara u okviru istog opšteg sastava, variranjem odnosa komponenti, ili podešavanjem samog tehnološkog postupka sinteze. To se može činiti u relativno širokim intervalima i gotovo u potpunosti programirano u skladu sa unapred definisanim zahtevima za različite mogućnosti primene [7]. Takođe, postupak sinteze ovih materijala je sve jeftiniji i jednostavniji. Oni poseduju i malu osetljivost na nečistoće, veliku stabilnost na jonizujuća zračenja i hemijsku stabilnost na većinu agresivnih hemijskih supstanci. Ovo su bitni razlozi koji su doveli do ogromnog porasta interesovanja, pa i publikovanih rezultata u vezi sinteze, karakterizacije i primene ovih materijala u poslednje dve decenije.

Mogućnost dobijanja velikog broja amorfne poluprovodnika različitog sastava i karakteristika, otvara široke mogućnosti i perspektive za primenu ovih materijala u elektronici i optoelektronici, a pogotovo u proizvodnji memorijskih medijuma (električne i optičke memorije), pasivnih i aktivnih optoelektronskih komponenti i senzora [7, 8].

Jedna od važnih primena u elektronici i optoelektronici gde električne karakteristike amorfni poluprovodničkih halkogenida imaju veliki značaj su nelinearni prekidački elementi (sa i bez memorijskog efekta) [16, 28-30]. Fenomen postojanja negativne otpornosti i prelaska komponente iz visokoomskog u niskoomsko stanje sa povećanjem električnog polja je otkriveno još davne 1913. godine. Prekidački efekat je prvo pronađen u polikristalnim materijalima, dok je u amornim materijalima ovaj efekat otkrio i prvi primenio Ovshinsky 1959. Zainteresovanost za ovaj fenomen u halkogenidnim materijalima porastao je nakon publikovanja rada [9], nakon čega je ovaj efekat nazvan "ovonic switch". Ovaj fenomen u halkogenidnim amornim poluprovodnicima postaje naročito interesantan dvadesetak godina nakon toga, najviše zahvaljujući razvoju tehnologije izrade i testiranja nelinearnih prekidačkih elemenata kao i u postojanju velikog broja potencijalnih i postojećih različitih primena u optičkim i električnim komponentama i uređajima (električno i optičko skladištenje informacija, prekidačke komponente, termistori, oscilatori, itd.) [16, 28-30].

Pokazano je da amorfni poluprovodnici iz sistema $Cu_x(AsSe_{1.4}I_{0.2})_{100-x}$ poseduju relativno visoke električne otpornosti i izražen nelinearni prekidački efekat [10-12]. U ovom radu biće prikazane eksperimentalno određene vrednosti električnih i prekidačkih parametara prekidačke komponente bazirane na visokootpornom amornom halkogenidnom poluprovodniku $Cu_1(AsSe_{1.4}I_{0.2})_{99}$. Takođe, biće posmatrana i veza tih parametara i njihova zavisnost od temperature i frekvencije. Posebna pažnja će biti usmerena na uticaj vrednosti energija aktivacije amornog poluprovodnika, njegove provodljivosti u stacionarnom i dinamičkom režimu, kao i radne temperature na prekidačke parametre realizovane prekidačke komponente.

2. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Električna provodljivost i u naizmeničnom (AC) režimu na više različitih temperatura merene su pomoću instrumenata HP 4149A i adaptera 16047A, koji su prikazani na sl. 1.



Slika 1. Analizator impedanse (Impedance/Gain - Phase Analyzer) HP 4149A i adapter 16047A

Instrument HP 4149A služi za merenje impedanse, admitanse, otpornosti, kapacitivnosti, induktivnosti, itd. u zavisnosti od frekvencije u opsegu od 100 Hz do 40 MHz (sa mogućnošću proširenja do 100 MHz sa odgovarajućom

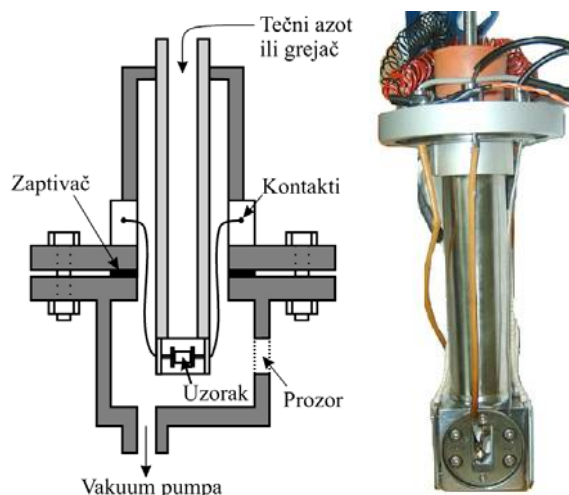
sondom). Instrument parametare poput Z , θ , R_s , C_s , L_s , C_p , $D = \tan\delta$ i Q preračunava na osnovu izmerenih realnih i imaginarnih komponenti impedanse (R i X) i admitanse (G i B). Instrument poseduje mogućnost izračunavanja i parametra modela same komponente ili kola. Rezolucija merenja može se podešavati od 1 do 400 mernih tačaka na pomenutom frekventnom intervalu, sa mogućnošću usrednjavanja izmerenih veličina do 256 puta. U zavisnosti od željene tačnosti jedno merenje može trajati od nekoliko sekundi do oko sat vremena. HP 4149A analizator impedanse koristi mostnu metodu (auto balancing bridge) za merenje impedanse, koja je najbolji izbor za merenje impedanse u opsegu od 100 Hz do 100 MHz.

Kondenzatorska metoda merenja sa postavljanjem uzorka između paralelnih ploča – elektroda (eng. parallel plate) je jedna od najkorišćenijih, najtačnijih i najjednostavnijih metoda merenja kako električnih tako i dielektričnih karakteristika uzoraka, na nižim i srednjim frekvencijama do 10 MHz [13]. Na slici 2. je prikazan princip pravljenja i izgled sintetisanih uzoraka. Elektrode su napravljene nanošenjem srebrne paste.



Slika 2. Princip pravljenja i izgled uzoraka

Za ispitivanje uzoraka na više različitih temperatura korišćena je temperaturna komora RIIC VLT-2 (variable temperature cell), čija je skica i unutrašnji izgled dat na sl. 3. Temperaturni režim se može odabrati za merenje ispod i iznad sobne temperature. Za niže temperature u šuplju cev nosača se sipa tečni azot i nosač se ohladi na temperaturu ključanja tečnog azota (77 K). Za zagrevanje se koristi grejač sa autotransformatorskim napajanjem, koji omogućava kontinualno i regulisano zagrevanje uzorka podešljivom brzinom (0.5 - 10 °C/min) do maksimalno 250 °C.



Slika 3. Skica i unutrašnji izgled temperaturne komore

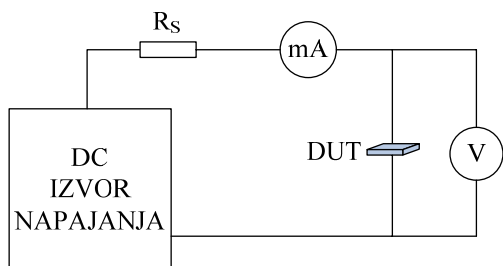
Za precizno podešavanje i održavanje željene konstantne temperature korišćen je temperaturni kontroler Beckman model CTC 250 (PID tipa). Temperatura je kontrolisana sa bakar-konstantan termoparom visoke tačnosti.

Za merenje naponom i strujom kontrolisanih I-U karakteristika (statički režim) realizovanih prekidačkih komponenti [12] korišćen je instrument SourceMeter Keithley 2410 (sl. 4).



Slika 4. SourceMeter Keithley 2410

Ovaj instrument ima mogućnost povezivanja sa računarnom i širok opseg merenja struja i napona sa visokom rezolucijom. On je namenjen za eksperimente u kojima se zahteva veza između uređaja koji služe za napajanje i onih koji su namenjeni za merenje struje, napona i otpornosti [14]. U njemu su objedinjeni strujni i naponski izvor, kao i voltmetar, ampermetar i ommetar visokih performansi. Povezivanje uređaja i komponente koja se testira obavlja se kao na sl. 5, pri čemu DUT (device under test) predstavlja komponentu koja se ispituje.



Slika 5. Kolo za merenje I-U karakteristike

Prilikom merenja, da bi se potvrdili i proverili dobijeni rezultati, eksperiment se ponavlja minimalno 3 puta. Na taj način se izbegava i gruba greška koja može da se javi usled loše izvedenih kontakata ili pogrešno postavljenih parametara na samom instrumentu. Rezultati merenja su pokazali da je ponovljivost dobijenih merenih veličina veoma dobra i da je odstupanje u granicama od $\pm 2\%$.

3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Utvrđeno je da provodljivost kod ispitivanog materijala raste sa porastom temperature što je uobičajeno kod većine materijala. Iz dobijenih rezultata [10] se može zaključiti da je provodljivost posledica termički aktiviranih procesa koji se mogu opisati Arenijusovom temperaturnom zavisnošću:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

gde su σ_0 i E_σ predeksponencijalni faktor i energija aktivacije provodljivosti respektivno, a k je Bolcmanova (Boltzmann)

konstanta. Parametri stacionarne provodljivosti ispitivanog amorfno poluprovodnika prikazani su u sledećoj tabeli.

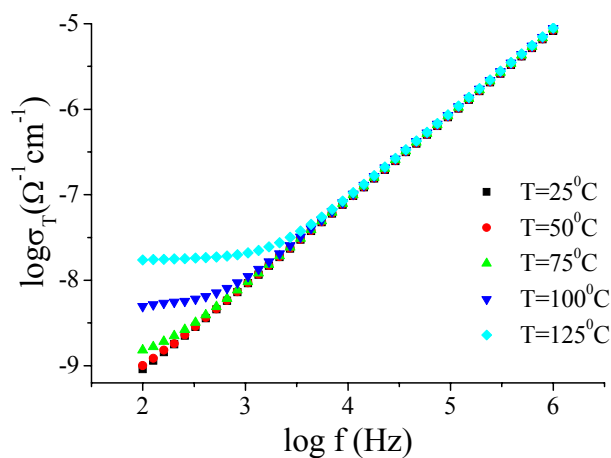
Tabela 1. Vrednosti energija aktivacije stacionarne provodljivosti E_σ , predeksponencijalnog množitelja σ_0 i negativnog logaritma specifične provodljivosti na sobnoj temperaturi za $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$

E_σ [eV]	σ_0 [$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$]	$-\log\sigma_{293K}$ [$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$]
0.73 ± 0.02	22.9 ± 1.1	11.20

Poznato je da u staklastim materijalima postoje čak četiri mehanizma stacionarne provodljivosti. Prema Motu i Dejvisu, sama energija aktivacije provodljivosti ne mora ukazivati na to koji je dominantni mehanizam provođenja [15]. U slučaju posmatranog sistema stakala ona je uporediva sa veličinom polovine širine optičkog procepa $E_g^{opt}/2$ [4], što ukazuje da je provodljivost uglavnom posledica prenosa nosilaca pobuđenih u lokalizovana stanja repova zona i E_σ predstavlja razliku između ivice procepa pokretljivosti i Fermijevog nivoa (E_C-E_F ili E_F-E_V). Uočljivo je, takođe, da je $E_g^{opt}/2 > E_\sigma$. Ova činjenica je u saglasnosti sa Motovim gledištem da položaj Fermijevog nivoa u amorfim materijalima nije tačno na sredini zabranjene zone zbog razlika u rasplinutosti (*smearing*) valentne i provodne zone [16], a takođe ukazuje i na aktivno učešće lokalizovanih defektnih stanja u elektronskim transportnim procesima.

Prema kriterijumu, koji su predložili Mot i Dejvis [15], veličina predeksponencijalnog množitelja σ_0 može dovoljno dobro ukazati na mehanizam provodljivosti u datom temperaturnom intervalu. U slučaju posmatranog sistema on je reda $10^1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ što prema ovoj klasifikaciji odgovara prenosu nosilaca po lokalizovanim stanjima repova zona.

Dinamička specifična el. provodljivost ispitivanog amorfno poluprovodničkog sistema određena je na više različitih temperatura, a rezultati su prikazani na slici 6.



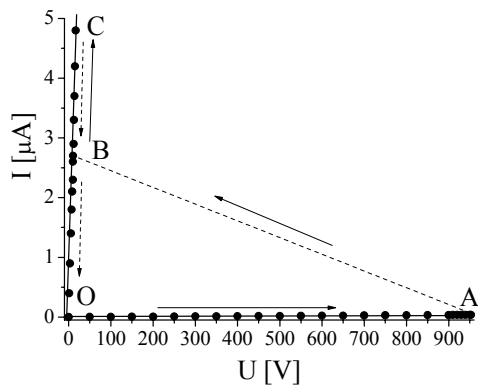
Slika 6. Frekventna zavisnost AC provodljivosti stakla $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ na različitim temperaturama

Provodljivost pri naizmeničnoj struji pri relativno visokim frekvencijama slabo zavisi od temperature. Prelaz ka

eksponencijalnoj temperaturnoj zavisnosti $\sigma(\omega)$ zapažen je pre svega u oblasti niskih frekvencija, a temperatura ovog prelaza se povećava sa porastom frekvencije. U oblasti niskih frekvencija vrednost $\sigma(\omega)$ teži ka σ_0 . Sa povećanjem temperature, $\sigma(\omega)$ sve manje zavisi od frekvencije i teži ka σ_0 , što svedoči o tome da se prenos nosilaca ostvaruje po lokalizovanim stanjima. Sa povišenjem temperature dijapazon frekvencija u kojem $\sigma(\omega)$ slabo zavisi od frekvencije se širi. Međutim, u bilo kom slučaju pri ekstrapolaciji frekventne zavisnosti $\sigma(\omega)$ ka nultoj frekvenciji, dobija se takva vrednost provodljivosti, koja se sa tačnošću do greške merenja poklapa sa σ_0 .

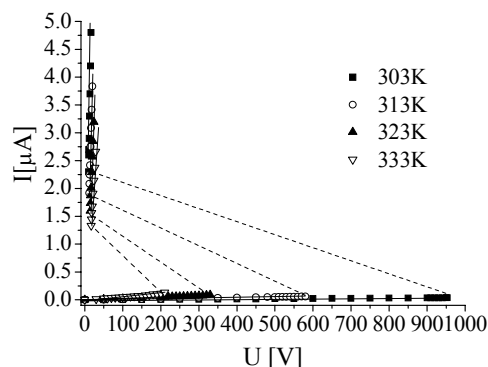
Statička I-U karakteristika na sobnoj temperaturi za prekidačku komponentu sa aktivnim elementom od $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ debljine 0.2 mm, dobijena korišćenjem naponske pobude, prikazana je na sl. 7 (strelica sa punom linijom predstavlja region porasta struje, dok strelica sa isprekidanom linijom predstavlja region opadanja struje). Uočava se da postepenim povećanjem napona od nulte vrednosti, struja linearno raste. Taj deo karakteristike predstavlja OFF stanje sa visokom otpornošću prekidačke komponente. U tački A dolazi do naglog skoka vrednosti struje i radna tačka veoma brzo skače u tačku B (vreme tog prelaza je oko 10^{-9} s [17]), pri čemu dolazi do pada napona. Nagli pad napona na segmentu AB (sl. 8) nastaje zbog formiranja lokalizovanih visoko provodnih kanala duž poprečnog preseka aktivnog elementa [18]. Daljim povećanjem pobudnog napona dolazi do povećanja struje bez značajnog povećanja napona (karakteristika je skoro vertikalna u segmentu OC). Taj deo karakteristike predstavlja ON stanje prekidačke komponente sa malom električnom otpornošću aktivnog elementa. Kada se u ovom stanju počne smanjivati napon pobude (segment CO), struja opada sve dok ne dostigne nultu vrednost.

Posmatrana nelinearna zavisnost karakteristike prilikom prelaska iz OFF stanja u ON ima tipičnu strujom kontrolisanu negativnu otpornost (CCNR – current controlled negative resistance), što je karakteristično za prekidačke komponente sa memorijom. Ovakvo ponašanje ima veliki broj realizovanih prekidačkih komponenti sa aktivnim elementom od amorfni poluprovodničkih halkogenida [47, 48, 64, 69, 75].



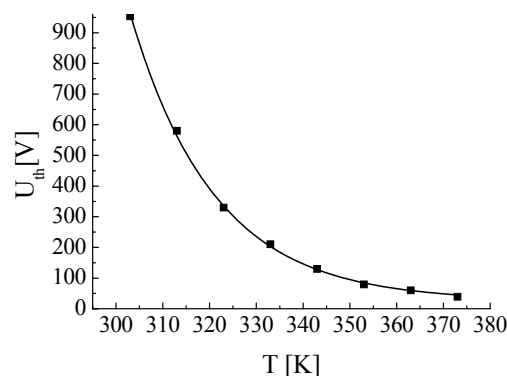
Slika 7. Statička I-U karakteristika prekidačke komponente sa aktivnim elementom od $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$

Uticaj radne temperature na I-U karakteristike prekidačke komponente sa aktivnim elementom od $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ je prikazan na sl. 8.

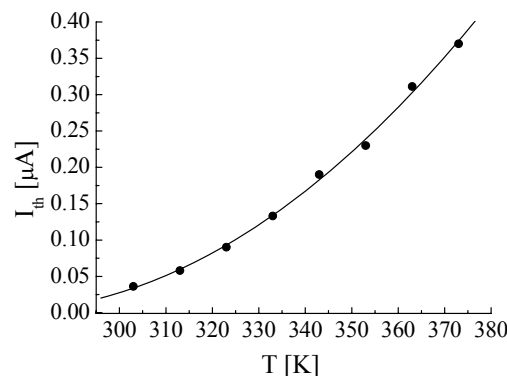


Slika 8. I-U karakteristike prekidačke komponente sa aktivnim elementom od $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ za različite vrednosti radne temperature

Kao što se vidi sa slike 9 napon praga U_{th} opada eksponencijalno, dok struja praga I_{th} raste eksponencijalno sa porastom temperature. Ovakva uočena zavisnost pomenutih parametara je pronađena i kod drugih amorfni halkogenidnih poluprovodničkih aktivni elemenata, kako u balk formi [19] tako i u formi filma [20]. Razlog ovakve temperaturne zavisnosti leži u činjenici da prilikom porasta radne temperature termalna energija, potrebna za stvaranje uskih kristalnih kanala u amorfnoj matrici, postaje sve niža i zato amplituda napona praga U_{th} opada sa porastom radne temperature.



a)



b)

Slika 9. Zavisnost a) U_{th} i b) I_{th} prekidačke komponente sa $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$ od radne temperature

4. ZAKLJUČAK

Eksperimentalno su određeni električni i prekidački parametri prekidačke komponente bazirane na visokootpornom amorfnom halkogenidnom poluprovodniku $\text{Cu}_1(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$. Pokazano je da amorfni poluprovodnici iz sistema $\text{Cu}_x(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{100-x}$ poseduju relativno visoke električne otpornosti i izražen nelinearni prekidački efekat. Na prekidačke parametre realizovane komponente veliki uticaj imaju vrednosti energija aktivacije amornog poluprovodnika, i sa njenim povećanjem raste napon praga prekidačkog efekta U_{th} . Pokazano je i da napon U_{th} opada eksponencijalno, dok struja praga I_{th} raste eksponencijalno sa porastom temperature.

5. ZAHVALNOST

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru projekta „Amorfni i nanostrukturni halkogenidi” pod brojem 141026.

LITERATURA

- [1] J. S. K. Singh, "Advances Amorphous Semiconductors," *CRC Press, London*, 2003.
- [2] E. Barsoukov and J. Ross Macdonald, "Impedance Spectroscopy – Theory, Experiment, and Applications," *Oxford science publications, sixth edition, Great Britain*, 1998.
- [3] A. C. Wright, "Amorphous insulators and semiconductors," *eds.: Thorpe M.F., Mitkova M.I., Kluwer USA*, 1997.
- [4] S. R. Lukić and D. M. Petrović, "Complex amorphous chalcogenides: Thermal stability and crystallization tendency, Physics applications of disordered materials," *edited by M. Popescu, Romania*, pp. 259-276, 2002.
- [5] M. Popescu, "Non-Crystalline Chalcogenides," *Kluwer academic publishers, USA*, 2002.
- [6] M. Popescu, "Disordered chalcogenide optoelectronic materials: Phenomena and applications," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 7, pp. 2189-2210, Aug 2005.
- [7] A. S. Glebov, "Semiconducting Chalcogenide Glass III: Applications of Chalcogenide Glasses, ed R Fairman and B Ushkov," *London: Elsevier Academic Press*, vol. 80, 2004.
- [8] A. Madan and M. P. Shaw, "The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors," *Academic Press, London*, 1988.
- [9] S. R. Ovshinsky, "Reversible electrical switching phenomena in disordered structures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 21, pp. 1450-1453, 1968.
- [10] S. R. Lukić, D. M. Petrović, and A. F. Petrović, "Effect of copper on conductivity of amorphous AsSe_yI_z ," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 241, pp. 74-77, Nov 1 1998.
- [11] M. P. Slankamenac, S. R. Lukic, and M. B. Živanov, "Analysis of Electrical Switching Effects in the Chalcogenide Glassy Semiconductor $\text{Cu-1(AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{99}$," *Hemijaska Industrija*, vol. 63, pp. 183-187, May-Jun 2009.
- [12] M. P. Slankamenac, S. R. Lukić, and M. B. Živanov, "Electrical switching in the bulk metal chalcogenide glassy semiconductor $\text{Cu}_{10}(\text{AsSe}_{1.4}\text{I}_{0.2})_{90}$," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 24, pp. 29-36, 2009.
- [13] D. Sekulić, M. P. Slankamenac, and M. Živanov, "Merenje električnih i dielektričnih karakteristika materijala i komponenti," *Tehnika - Novi materijali*, vol. 17, 2008.
- [14] <http://www.teknetelectronics.com/KEITHLEY.pdf>.
- [15] N. F. Mott and E. A. Davis, "Electronic Processes in Non-Crystalline Materials," *Oxford, U.K. Clarendon*, 1979.
- [16] E. Abd El-Wahab, M. M. El-Samanoudy, and M. Fadel, "Electrical conductivity and optical absorption of $(\text{Ge}_2\text{S}_3)_1(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_1$ amorphous thin films," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 174, p. 106, 2001.
- [17] H. Fritzsche, "Why are chalcogenide glasses the materials of choice for Ovonic switching devices?," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 68, pp. 878-882, May-Jun 2007.
- [18] H. Fritzsche, "Physics of Instabilities in Amorphous Semiconductors," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 13, pp. 515-521, 1969.
- [19] A. S. Soltan and A. H. Moharram, "Electrical switching in the chalcogenide $\text{AS}(60-x)\text{Te}(40)\text{Cu}(x)$ glasses," *Physica B-Condensed Matter*, vol. 349, pp. 92-99, 2004.
- [20] M. M. Abdel-Aziz, "Memory switching of germanium tellurium amorphous semiconductor," *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 2059-2065, 2006.