



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Električni transport u biomorfnom poluprovodniku na bazi kalaj oksida

-*Master rad-*

Mentor 1: dr Marko Radović,
naučni saradnik, Institut Biosens, Univerzitet u Novom Sadu.

Mentor 2: dr Vesna Bengin,
redovni profesor, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.

Kandidat: Sonja Stefanović

Novi Sad, 2020

Zahvalnica

Master rad je urađen u Institutu BioSens u Novom Sadu. Posebnu zahvalnost dugujem svojim komentorima dr Marku Radoviću, pod čijim je rukovodstvom urađen ovaj rad i dr Vesni Bengin, na ukazanom poverenju i podršci prilikom izrade master rada.

Zaposlenima Instituta BioSens dugujem veliku zahvalnost zbog uslova koje sam imala tokom izrade master rada i na ogromnoj tehničkoj podršci bez koje izrada ovog rada ne bi bila moguća. Zahvaljujem se dr Branku Šikopariji, koji je učestvovao u odabiru i prikupljanju polena. Zahvaljujem se dr Slavici Savić jer nam je obezbedila osnovnu hemikaliju za sintezu SnO₂ materijala i pružila neophodnu stručnu pomoć tokom procesa sinteze. Takođe, želela bih da se zahvalim MSc Minji Mladenović i MSc Jovani Stanojević iz Instituta BioSens, na pomoći i savetima prilikom rada u hemijskoj laboratoriji. Rad je bio neizmerno lakši, efektivniji, efikasniji i zanimljiviji. Zahvaljujem se dr Žoržu Duboru (fr. *Georges Dubourg*), iz Instituta BioSens, na ogromnoj pomoći tokom sítu štampe.

Zahvaljujem se zaposlenima i osoblju Prirodno-matematičkog fakulteta, Fakulteta tehničkih nauka i Tehnološkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu. Hvala profesorki dr Željki Cvejić koja je prepoznała moј potencijal tokom osnovnih i master studija i preporučila me Institutu BioSens kao kandidata za izradu master rada. Zahvaljujem se dr Milošu Borkovu, iz Univerzitetskog centra za elektronsku mikroskopiju u Novom Sadu, na urađenim SEM merenjima. Zahvaljujem se MSc Andrei Nesterović na pomoći tokom sinteze materijala i na odradjenim XRD merenjima. Zahvaljujem se dr Nataši Samardžić na urađenim merenjima Holovog efekta i merenjima impedanse.

Hvala Dejani, Lani, Živani, Bojani, Ivani, Mariji, Neveni na uspomenama, zajedničkim trenucima i podršci tokom izrade master rada.

Koristim priliku da se zahvalim svojim roditeljima Milovanu i Biljani Stefanović za razumevanje i nesibičnu ljubav, kao i sestri Mariji na savetima i podršci.

Hvala svima koji su bili uz mene tokom ovog perioda, a nisam ih neposredno pomenula! Ovaj period ću pamtiti kao najlepši period tokom studiranja.

Sonja Stefanović

Sadržaj

<u>1. Uvod</u>	<u>1</u>
<u>2. Kalaj oksid, SnO₂</u>	<u>2</u>
2.1 Kristalna i elektronska struktura	2
2.2 Sinteza biomorfnog SnO ₂	3
<u>3. Električni transport u poluprovodničkim materijalima</u>	<u>6</u>
3.1 Osnovna podela materijala prema električnim svojstvima	6
3.2 Semi-klasičan model električnog transporta	8
3.3 Električni kontakti	10
3.4 Eksperimentalni uređaj za merenje poluprovodničkih svojstava	11
<u>4. Rezultati i diskusija</u>	<u>13</u>
<u>5. Zaključak</u>	<u>24</u>
<u>6. Literatura</u>	<u>25</u>

„When you can measure what you are speaking about, and express it in number, you know something about it; but when you cannot express it in number, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your own thoughts, advanced to the state of science.“

William Thomson, Lord Kelvin

1. Uvod

Biomimetika (grčka reč βίος – život, μιμητικός- imitirajući, oponašajući) je termin za kombinaciju nauka biologije, hemije, matematike i fizike u cilju proučavanja struktura i funkcija bioloških sistema kao modela za konstruisanje raznih uređaja i materijala u tehnologiji. Dala je doprinos razvoju novih tehnologija inspirisanih imitiranjem i reprodukovanjem rešenja iz prirode [1]. Priroda predstavlja neiscrpan izvor inspiracije čovečanstvu, nudeći nam različite primere inovativno dizajniranih materijala, od nano do mikro veličina. Upotreba bioloških materijala kao šablona ili kalupa za sintezu neorganskih materijala intenzivno se istražuje poslednjih godina. Jedinstvenost i različita geometrija bioloških struktura može biti kombinovana sa funkcionalnim osobinama, sa ciljem da se dobiju jedinstvena struktura, morfologija, optička i električna svojstva. Sinteza biomorfnih poluprovodničkih materijala, koristeći prirodne oblike i šablove sa hijerarhijskom nanostrukturu, omogućava postizanje visoke poroznosti i velike specifične površine [2], što bi moglo efikasno povećati osobine materijala i poboljšati performanse u detekciji relativne vlažnosti vazduha, svetlosti i temperature.

Kalaj oksid je materijal sa malom električnom otpornošću i visokom optičkom transparencijom u vidljivom delu elektromagnetskog spektra. Poseduje specifičnu elektronsku strukturu, te samim tim jeste potencijalni materijal za optoelektronske primene [3]. Transparentan je u vidljivoj oblasti zbog velikog energetskog procepa od 3.6 eV. Provodna zona ima izolovani minimum u Γ tački i disperzija u ovom delu provodne zone omogućava malu efektivnu masu elektrona što uzrokuje njihovu veliku mobilnost. Kalaj oksid se zbog navedenih osobina ponaša kao „providna elektroda“. Navedene karakteristike omogućavaju široku primenu u solarnim ćelijama, svetlostno emitujućim diodama, panelima ekrana i drugim optoelektronskim uređajima [4].

Cilj master rada je proučavanje efekata koji utiču na električni transport u biomorfnom poluprovodniku na bazi kalaj oksida. Ispitivani su mehanizmi koji stoje iza provodnosti u režimu jednosmernih i naizmeničnih struja. Na osnovu merenja Holovog efekta je utvrđeno da je sintetisani kalaj oksid n-tip poluprovodnika, sa niskom koncentracijom slobodnih nosilaca nalektrisanja kao i da elektroni imaju veliku mobilnost u ovom materijalu. Merenja strujno naponskih kriva, u režimu jednosmernih struja, su potvrdila rezultate merenja Holovog efekta, pri čemu je ustanovljeno da sintetisani poluprovodnik ima odstupanje od linearne zavisnosti struje od primjenjenog napona, što direktno ukazuje na formiranje Šotkijeve barijere u električnom kontaktu. Merenje transportnih svojstava u režimu naizmeničnih struja je pokazalo da glavni uticaj na otpornost biomorfnog poluprovodnika potiče od relaksacionog procesa karakterističnog za model granice zrna. Ispitivanje uticaja relativne vlažnosti vazduha, elektromagnetnog zračenja iz optičkog spektra i temperature na ponašanje strujno naponskih kriva je pokazalo da se biomorfni poluprovodnik može koristiti kao elektrohemski senzor vlažnosti vazduha, kao i da porast temperature iznad 100 °C dovodi do dramatičnog porasta električne provodnosti usled termalne aktivacije.

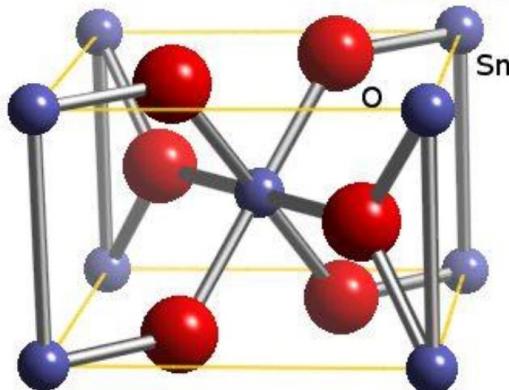
Ovaj master rad sastoji se od šest poglavlja. U prvom poglavlju je predstavljen uvod u kome objašnjavamo izbor tematike i čitaocu detaljnije upoznajemo sa istom. Drugo poglavlje sadrži opis kristalne i elektronske strukture SnO_2 kao i proces sinteze biomorfnog kalaj oksida. Treće poglavlje daje sažet teorijski osvrt na podelu materijala prema električnim svojstvima, opis poluprovodničkih materijala, kvazi-klašičnu teoriju električne provodnosti, opis pojma električnih kontakata i opis eksperimentalnog uređaja za merenje električnih svojstava. Četvrto poglavlje sadrži pregled i analitičku diskusiju dobijenih rezultata. U petom poglavlju je predstavljen zaključak master rada. Spisak korišćene literature je dat na kraju rada, u šestom poglavlju.

2. Kalaj oksid, SnO_2

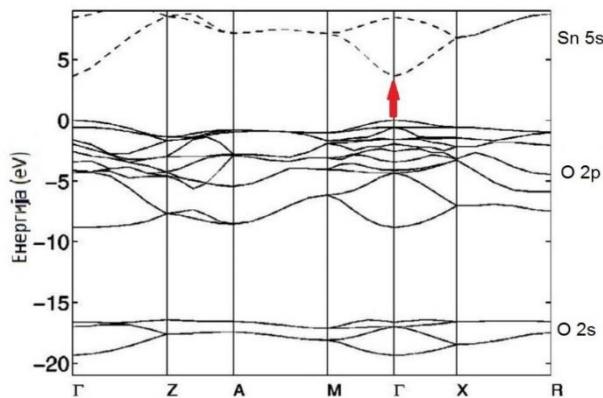
2.1 Kristalna i elektronska struktura

Kalaj oksid kristališe u rutilnu kristalnu strukturu koja ima tetragonalnu jediničnu čeliju sa prostornom grupom simetrije $P42/mnm$, koja je prikazana na slici 1. Svaki atom kalaja okružen je sa šest kiseonikovih atoma u oktaedarskom okrženju, a svaki kiseonikov atom okružen je sa tri atoma kalaja u planarnom okrženju. Atomi kalaja prikazani su plavim sferama, a atomi kiseonika crvenim sferama na slici 1 [5].

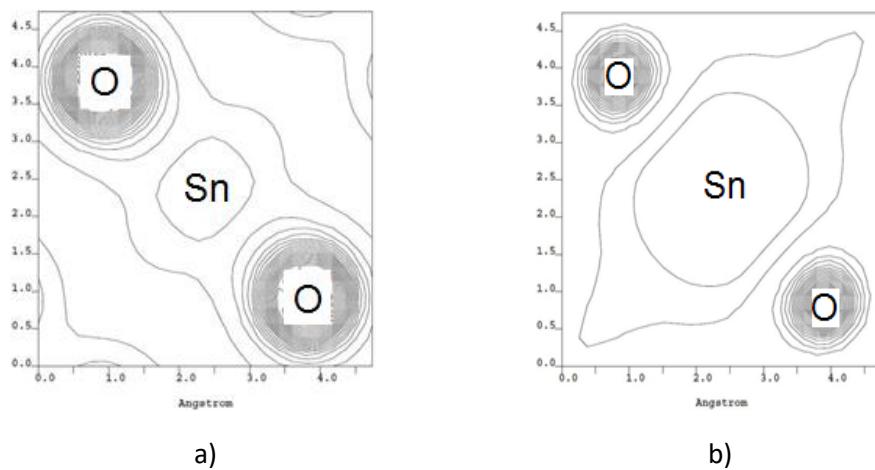
Elektronska struktura SnO_2 je teorijski i numerički određena na osnovu funkcionala gustine stanja (eng. *Density functional theory - DFT*) i prikazana je na slici 2. Zona ispod -15 eV sačinjena je od 2s stanja, dok je valentna zona (od 0 eV do -8 eV) pretežno sačinjena od 2p stanja. Ova stanju su hibridizovana s 1 p stanjima Sn, ali je njihov doprinos mali, usrednjeni je preko cele Briluenove zone. Najizraženija struktura na slici 2 predstavlja minimum provodne zone formiran od Sn 5s stanja [6]. Crvenom strelicom označen je glavni prelaz iz valentne u provodnu zonu. Ovaj minimum udaljen je oko 3.6 eV od valentne zone i u okolini ove tačke nema drugih minimuma koji bi ukazali na indirektni energetski procep [7].



Slika 1. Jedinična čelija kalaj oksida.



Slika 2. Elektronska struktura kalaj oksida izračunata na osnovu teorije funkcionalne gustine stanja (eng. *Density functional theory, DFT*) [8].



Slika 3. Realne prostorne distribucije ukupne koncentracije naelektrisanja za: a) valentnu i b) provodnu zonu kalaj oksida [9].

Na slici 3 prikazane su prostorne distribucije gustine naelektrisanja za: a) valentnu i b) provodnu zonu kalaj oksida [9]. Na osnovu prikaza distribucije ukupne koncentracije naelektrisanja vidi se da je najveća gustina valentnih stanja u okolini kiseoničkih jona. Ova činjenica jasno ukazuje da O 2p stanja najviše dopirinose formiranju valentne zone. U provodnoj zoni u okolini Γ tačke vidi se da najveći doprinos u provodnoj zoni daju Sn 5s stanja koja imaju veliku prostornu rasprostranjenost što omogućava veliku pokretljivost slobodnih nosilaca naelektrisanja i dobru elektronsku provodnost materijala. Efektivna masa elektrona u provodnoj zoni je mala i iznosi oko 0.38 m_e [9].

2.2 Sinteza biomorfnog SnO_2

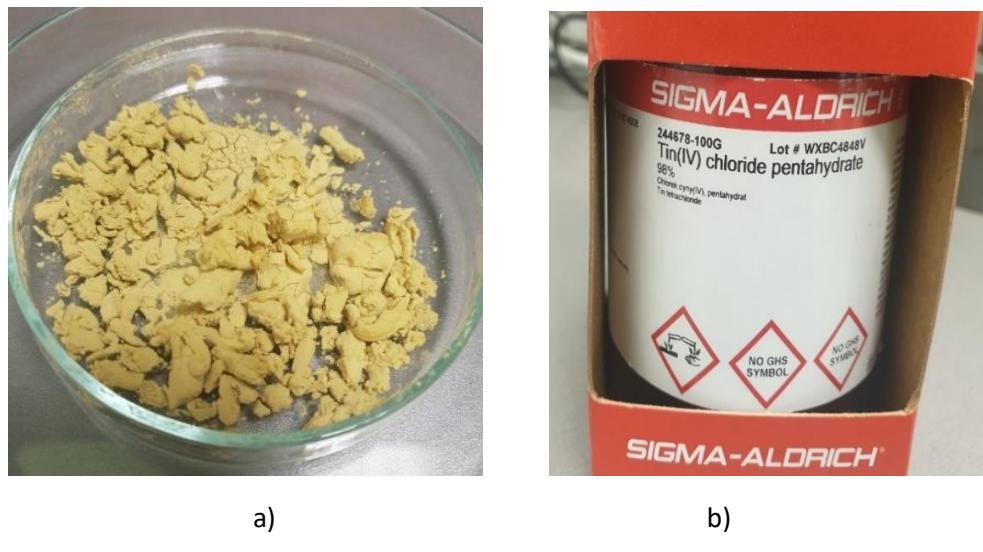
Jedna od osnovnih ideja, na osnovu koje je pokrenut predstavljeni istraživački rad, je da se klasične metode sinteze kalaj oksida optimizuju koristeći prirodne šablove, odnosno kalupe, poput čestica polena. Sinteza je izvršena u hemijskoj laboratoriji Instituta BioSens. Ovaj korak u radu zahtevaо je izuzetnu strpljivost i upornost.

Koristili smo polen crne jove (lat. *Alnus glutinosa*) zato što su čestice polena veoma malih dimenzija, što nam daje veliku specifičnu površinu sintetisanog poluprovodničkog materijala. Polen crne jove je lako dostupan u prirodi i ima ga u velikim količinama. Na slici 4 je prikazan izgled drveta crne jove sa izdvojenim prikazom cvetova.

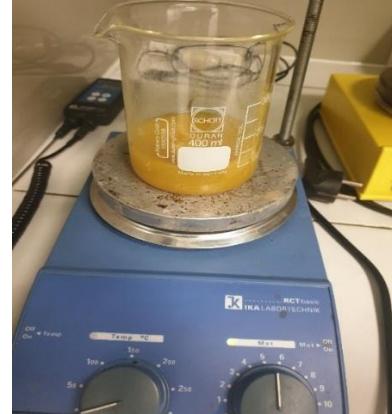
Pre upotrebe sirovi polen jove je očišćen i odmašćen koristeći etanol. Čišćenje i ispiranje je urađeno tri puta, koristeći centrifugu na 2000 ob/min. Sama priroda sinteze je takva da su potrebne velike količine polena da bi se dobila minimalna količina kalaj oksida neophodna za karakterizaciju i dalje tehnološko procesiranje. Jedan gram obrađenog polena jove (slika 5 a)) suspendovan je u 100 ml etanola i tretiran ultrazvučnom sondom u trajanju od 5 minuta sa ciljem da se razbiju aglomerisane čestice i da se dobije što kvalitetnija suspenzija. Kalaj hlorid pentahidrat ($\text{SnCl}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich) mase 1 gram, suspendovan je u 100 ml etanola i takođe tretiran 5 minuta ultrazvučnom sondom. Rastvor kalaj hlorid pentahidrata u etanolu dodat je obrađenom polenu jove suspendovanom u etonalu i mešani su konstantno na magnetnoj mešalici IKA (slika 6) u trajanju od 20 časova. Proces mešanja naziva se impregnacija jer se tokom ovog postupka čestice polena impregniraju sa prekursorom (SnCl_4) sa ciljem da se dobiju čestice biomorfnog oblika.



Slika 4. Prikaz drveta crne jove sa izdvojenim cvetovima.



Slika 5. a) Osušen i centrifugiran polen jove. **b)** SnCl_4 prekursor za sintezu kalaj oksida.



Slika 6. Impregnacija čestica polena jove suspenzijom kalaj hlorida, koristeći magnetnu mešalicu IKA na sobnoj temperaturi.

Nakon toga, suspenzija je filtrirana u Bihnerovom levku, koristeći filter papir otvora $12 \mu\text{m}$ – $15 \mu\text{m}$, sa ciljem izdvajanja impregniranih čestica polena (slika 7). Otvori na filter papiru dovoljno su mali da zadrže impregnirane čestice polena, ali i dovoljno veliki da ostale čestice manjih dimenzija mogu proći, pa ih tako propuštaju ispiranjem. Tokom filtriranja dobijeni prah je ispiran dva puta etanolom i jednom dejonizovanom vodom. Poznato je da je etanol bezbojna tečnost, a nakon prolaska kroz filter papir uočava se svetlo žuta boja (slika 7 a)). Obojena tečnost dokazuje da su ispiranjem eliminisane čestice manjih dimenzija od otvora na filter papiru. Ponovljen je postupak ispiranja etanolom, radi ponovnog eliminisanja sitnijih, primesnih čestica. Proces ispiranja je ponovljen, ali ovog puta dejonizovanom vodom, pri čemu se uočava da boja tečnosti nije promenjena prilikom prolaska kroz Bihnerov levak (slika 7 b)). Ovim se utvrđuje da su izdvojene impregnirane čestice polena. Filter papir zajedno sa filtriranim prahom je sušen na 80°C u trajanju od 2h, da bi se izbegla mogućnost pojave buđi na polenu i uništenja uzorka. Nakon sakupljanja iz prirode, polen se čuva potopljen u etanolu ili bez prisustva vlažnosti u sebi. Bitno je da je polen suv ili potpuno potopljen u etanolu.

U saradnji sa Tehnološkim fakultetom u Novom Sadu, uzorak je kalcinisan na 570°C u trajanju od 2 sata, sa korakom grejanja od $2^\circ\text{C}/\text{min}$. Kalcinacijom na zadatoj temperaturi su uklonjene organske komponente iz filtriranog praha, kao i voda, etanol, hloridi i same čestice polena. Proces sinteze ponovljen je nekoliko puta.



Slika 7. Ispiranje i filtriranje. **a)** Proces ispiranja impregniranih čestica etanolom na filter papiru u Bihnerovom levku. **b)** Poslednje ispiranje vodom i zadržavanje jedino impregniranih čestica polena.

3. Električni transport u poluprovodničkim materijalima

Transport energije je od davnina zaokupljivao pažnju naučnika. Istraživanja u ovoj oblasti su omogućila tehnološke skokove, doprinela industrijskim revolucijama i oblikovala savremeno društvo. Tako možemo hronološki pratiti uticaj razvoja provodnih materijala na elektrifikaciju, energetiku, saobraćaj, na razvoj računarske tehnike i uspostavljanje četvrte industrijske revolucije. Iako se transportna svojstva istražuju intenzivno dugi niz godina, razvoj novih materijala i nanotehnologije su ponovo doveli ovu oblast u fokus kako teorijskih tako i eksperimentalnih istraživanja.

U ovom poglavlju je predstavljen sažet teorijski opis podele materijala prema provodnim svojstvima, ilustrovani su mehanizmi električnog transporta u poluprovodničkim materijalima i definisan je pojam električnih kontakata. Na kraju poglavlja je dat opis eksperimentalnog uređaja za merenje električnog transporta u poluprovodnicima.

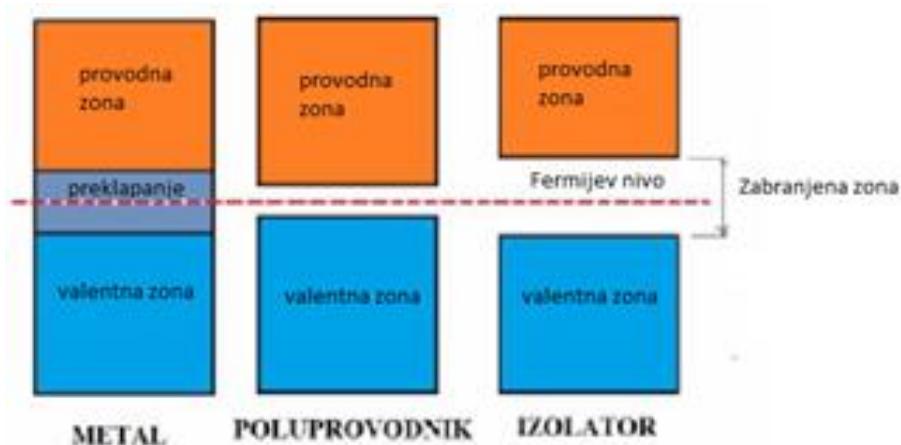
3.1 Osnovna podela materijala prema provodnim svojstvima

Prema provodnim svojstvima, materijali se mogu podeliti na:

- metale,
- poluprovodnike i
- izolatore.

Osnovna podela materijala prema provodnim svojstvima je ilustrovana na slici 8. Generalno gledajući, razlika između metala sa jedne strane i poluprovodnika i izolatora sa druge strane je kvalitativne prirode, dok je razlika između poluprovodnika i izolatora kvantitativne prirode. Kao što je prikazano na slici 8, kod metala postoji preklapanje valentne i provodne zone dok kod poluprovodnika i izolatora imamo zabranjenu zonu koja razdvaja valentnu od provodne zone [10].

Iako je ovo jedna od najprostijih podela, iza ovakvog modela стоји обимно istraživanje, krunisano primenom kvantne mehanike u analizi osobina materijala i uvođenje zonskog modela elektronske strukture. U zonskoj teoriji razmatra se skup velikog broja atoma čvrsto vezanih u čvorovima kristalne rešetke.



Slika 8. Podela materijala prema provodnim svojstvima.

Pored hemijskog sastava, sama kristalna struktura, odnosno njena grupna i lokalna simetrija utiču na hibridizaciju elektronskih orbitala atoma koji grade kristalnu rešetku i dovode do formiranja energetskih zona. Valentni nivoi elektrona u rešetki su delimično popunjeni energetski nivoi koji formiraju valentnu zonu. Iznad valentne zone nalazi se provodna zona, koja je sastavljena od energetskih nivoa u kojima se elektroni mogu naći kada su u međuatomskom prostoru. Zabranjena zona obuhvata sve vrednosti energije koje elektroni ne mogu imati u osnovnom stanju. Prilikom razmatranja provodnih svojstava materijala od posebnog značaja su valentna i provodna zona, čija širina je od nekoliko do desetak eV, a razmak susednih energetskih podnivoa u istoj zoni je manji od 10^{-20} eV. U provodnoj zoni kod poluprovodnika, mogu se nalaziti samo ionizovani elektroni. Da bi napustili svoje atome, elektroni moraju da savladaju zabranjenu zonu pomoću energije koja je veća od širine zabranjene zone. To je moguće zagrevanjem materijala, elektromagnetskim zračenjem, ionizujućim zračenjem ili elementarnim česticama. U provođenju struje, odnosno električnom transportu, učestvuju samo slobodni elektroni, tj. elektroni koji se nalaze u provodnoj zoni kristala [10].

Najbolji provodnici električne struje su metali čija je širina zabranjene zone mala, tako da se valentna zona preklapa sa provodnom, te svi elektroni učestvuju u provođenju struje. Provodnici se zbog svojih izuzetnih transportnih svojstava koriste u transportu električne i toplotne energije.

Poluprovodnici predstavljaju veoma interesantnu klasu materijala, zbog činjenice da se njihova provodna svojstva mogu menjati od izolatorskog do metaličnog stanja. Širina zabranjene zone kod poluprovodnika iznosi od 1 eV do 4 eV. Broj valentnih elektrona je značajno manji nego u metalima i potrebna je mnogo veća energija za jonizaciju. U provodnoj zoni poluprovodnika postoji izvestan broj slobodnih elektrona koji su tu dospeli termalizacijom ili fotoekscitacijom iz valentne zone. Kod poluprovodnika nosioci nanelektrisanja mogu biti i šupljine u valentnoj zoni, zbog čega se ovi materijali dele na n i p tip poluprovodnika. U **svojstvenom poluprovodniku** broj slobodnih elektrona u provodnoj zoni je uvek jednak broju šupljina u valentnoj zoni, što je posledica pojave jonizacije u poluprovodniku. Poluprovodnik sa viškom slobodnih elektrona u odnosu na broj šupljina je poluprovodnik n-tipa, dok je sa viškom šupljina u odnosu na broj slobodnih elektrona p-tip poluprovodnika. Osnovna karakteristika svojstvenih poluprovodnika jeste da provodna zona ne sadrži elektrone na 0 K, dok je valentna zona ispunjena elektronima. Termičke vibracije atoma mogu da prekinu veze i kreiraju parove elektron-šupljina. **Primesni poluprovodnici** mogu biti donorski i akceptorski. Kod oksidnih poluprovodnika kao što je SnO_2 , kiseonične vakancije stvaraju donorske nivoe zbog čega se ovi materijali svrstavaju u primesne poluprovodnike. Poluprovodnici se razlikuju od metala po tome što gustina nosioca nanelektrisanja može da se menja sa dopiranjem ili promenom temperature, relativne vlažnosti vazduha, koncentracije gasa, zbog čega ovi materijali imaju široku primenu u senzorskim tehnologijama.

Izolatori obuhvataju materijale kod kojih je energetski precep veći od 4 eV i ovi materijali su loši provodnici električne struje i toplotne energije (izuzev dijamanta). Na sobnoj temperaturi, populacija elektrona u provodnoj zoni je veoma mala što je i glavni razlog loše elektronske provodnosti. Potrebno je napomenuti da određene vrste izolatora poseduju veoma dobру jonsku provodnost.

Pored navedene osnovne podele materijala postoji i klasa materijala (superprovodnici) koji se odlikuju provodnošću električne energije bez gubitaka odnosno otpornosti, ali oni nisu predmet ovog istraživanja.

3.2 Semi-klasičan model električnog transporta

Semi-klasičan pristup podrazumeva da ponašanje ili dejstvo električnog polja opisujemo pomoću klasičnih teorija, a ponašanje, odnosno kretanje elektrona tretiramo uvođenjem efektivne mase elektrona iz kvantne mehanike. Prema klasičnom modelu elektroni u kristalnom materijalu se posmatraju kao idealni gas u kojem nema međusobnih interakcija i električna provodnost se opisuje Omovim zakonom i Drudeovim modelom. Međutim, klasična teorija nije mogla da objasni mnogobrojna eksperimentalna zapažanja, zbog čega je teorija provodnosti morala da se unapredi korišćenjem kvantne mehanike.

Posmatraćemo dejstvo sile \mathbf{F} slabog spoljašnjeg statičkog (frekventno nezavisnog) električnog polja primjenjenog na poluprovodnik n-tipa. Koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja je dovoljno niska da možemo zanemariti njihovu međusobnu interakciju. Polje elektične sile dovodi do formiranja elektičnog potencijala Φ . Talasna jednačina vremenske evolucije elektrona u poluprovodniku pod uticajem potencijala predstavlja se izrazom:

$$(H_0 - e\Phi) \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

gde je H_0 – jedno elektronski Hamiltonian (bez spoljašnjih perturbacija), $\Psi(\mathbf{r}, t)$ – talasna funkcija elektrona u prisustvu električnog polja.

Ovom jednostavnom aproksimacijom može se opisati kretanje elektrona u spoljašnjem električnom polju klasičnom jednačinom kretanja. Sve dok je potencijal Φ dovoljno mali i ne menja se u prostoru možemo koristiti aproksimaciju za efektivnu masu da rešimo talasnu jednačinu vremenske evolucije elektrona u poluprovodniku. U ovom slučaju zanimaju nas nestacionarna rešenja, zbog čega umesto potpunog kvantno mehaničkog pristupa koristimo kvazi klasičan pristup. Nestacionarno rešenje proizvodi struju kao odgovor na primjeno polje. Operator gustine struje \mathbf{j} definisan je sa [10]:

$$\mathbf{j} = ne\mathbf{v}, \quad (2)$$

gde je n -koncentracija elektrona, \mathbf{v} -operator brzine elektrona.

Talasnu jednačinu elektrona možemo predstaviti kao Blohov talas, pri čemu radi jednostavnosti možemo pretpostaviti da je poluprovodnik izotropan i nedegenerisan, sa minimumom energije u centru Briluenove zone ($\mathbf{k}=0$). Disperziona relacija je tada:

$$E_c(k) = E_c(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (3)$$

gde je m^* -efektivna masa elektrona. Na ovaj način možemo opisati kretanje elektrona u spoljašnjem električnom polju koristeći drugi Njutnov zakon:

$$m \left(\frac{d\mathbf{r}^2}{dt^2} \right) + \frac{m^*}{\tau} \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = -e\mathbf{F} \quad (4)$$

gde je \mathbf{r} - vektor pozicije elektrona, τ - fenomenološko vreme odbijanja, uračunato za odbijanje elektrona od strane fonona i primesa.

Ova jednačina smatra se kvazi klasičnom zbog koncepta efektivne mase koji je usvojen iz kvantne mehanike i korsiti se za opisivanje kretanja elektrona i uračunava dejstvo ostalog nanelektrisanja na posmatrani elektron. U okviru ovakvog modela, kretanje bilo kog nanelektrisanja q može biti opisano klasičnom teorijom. Pod uticajem sile \mathbf{F} , stacionarno nanelektrisanje će se ubrzati, pri čemu se povećava brzina kao i drugi član sa leve strane jednakosti (4) $\frac{m^*}{\tau} \left(\frac{dr}{dt} \right)$. Brzina drifta dobijena je iz jednačine (4) pod uslovom da je $\frac{m^*}{\tau} \left(\frac{dr}{dt} \right) = 0$ i zamenom sa q -e na desnoj strani jednakosti dobija se:

$$\mathbf{v}_d = \frac{q\mathbf{F}\tau}{m^*} \quad (5)$$

Gustinu električne struje \mathbf{J} , koja se odnosi na \mathbf{v}_d , možemo definisati kao:

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d \quad (6)$$

Kombinovanjem jednačina (5) I (6) dobija se:

$$\mathbf{J} = \frac{nq\mathbf{F}\tau}{m^*} \quad (7)$$

Tenzor provodnosti $\boldsymbol{\sigma}$ definisan je sa:

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{F} \quad (8)$$

Za izotropnu sredinu, provodnost je dijagonalan tenzor sa svim dijagonalnim elementima jednakim:

$$\sigma = \frac{\tau n q^2}{m^*} \quad (9)$$

Na osnovu izraza (9) vidi se da provodnost zavisi od kvadrata nanelektrisanja poluprovodnika. Poluprovodnici se razlikuju od metala po tome što gustina nosioca može da se menja sa promenom temperature ili dopiranjem. Pogodno je definisati nosioc pokretljivosti m kao

$$v_d = \mu F \quad (10)$$

Kombinovanjem sa (5) dobijamo

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (11)$$

Za poluprovodnik koji sadrži slobodne elektrone i slobodne šupljine provodnost je data izrazom:

$$\sigma = e(n_e\mu_e + n_h\mu_h) \quad (12)$$

U indeksu e odnosi se na elektrone, h u indeksu na šupljine. Možemo konstatovati da provodnost kod poluprovodnika direktno zavisi od koncentracije slobodnih nosilaca nanelektrisanja i njihove mobilnosti.

Posmatrajmo slučaj kada je električno polje E koje deluje na poluprovodnik frekventno zavisno. Predpostavimo da poluprovodnik nema slobodnih nosilaca nanelektrisanja. Električna provodnost u ovom slučaju je kompleksna veličina i informacije o provodnosti su sadržane u kompleksnoj dielektričnoj funkciji:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (13)$$

gde realni deo ϵ' predstavlja dielektričnu konstantu a imaginarni deo ϵ'' opisuje gubitke energije u materijalu. Predpostavimo da je posmatrani poluprovodnik u obliku filma čija je površina A i debљina t.

Ukupni gubitci električne energije dati su izrazom (14):

$$L = \omega \varepsilon_0 \epsilon'' \left(\frac{A}{t} \right) E^2 \quad (14)$$

gde je ε_0 permitivnost vakuma. Električna provodnost se u datom slučaju može predstaviti relacijom:

$$\sigma(\omega) = \omega \varepsilon_0 \epsilon'' \quad (15)$$

U ovom slučaju električna provodnost se definiše kao gubitci koji potiču od vezanog nanelektrisanja, zbog čega ne bi trebalo da postoje gubitci, odnosno otpornost, za frekventno nezavisno električno polje (jednosmerna struja). Međutim, predstavljeni model polazi od predpostavke da poluprovodnik nema slobodnog nanelektrisanja. Kao što smo konstantovali u predhodnom poglavlju, svaki poluprovodnik na sobnoj temperaturi ima određenu koncentraciju slobodnog nanelektrisanja, koja pri niskim frekvencijama može oscilovati u skladu sa primenjenim električnim poljem. Na nultoj frekvenciji električnog polja doprinos provodnosti daju samo sloboni nosioci nanelektrisanja dok sa porastom frekvencije, doprinos provodnosti daju i slobodna i vezana nanelektrisanja. Izmerena električna provodnost σ_i tada iznosi [11]:

$$\sigma_i(\omega) = \sigma + \sigma(\omega) \quad (16)$$

Analizirajući izložene teorijske modele, možemo ustanoviti da ispitivanje transportnih svojstava materijala u režimu jednosmernih i naizmeničnih struja, nudi komplementarne informacije o tipu i prirodi nanelektrisanja i otkriva fundamentalne mehanizme koji stoje iza odličnih performansi poluprovodnika u savremenim tehnologijama.

3.3 Električni kontakti

Električni kontakt se generalno odnosi na fizički kontakt između metala i poluprovodnika. Kada su dva materijala različitih Fermijevih nivoa dovedeni u kontakt, slobodni nosioci će prelaziti od jednog materijala u drugi sve dok se ne izjednače Fermijevi nivoi oba materijala. To znači da su Fermijevi nivoi za elektrone u oba materijala u kontaktu jednaka. Tada se formira dvostruki električni sloj, pozitivno prostorno nanelektrisanje na jednoj strani i negativno na drugoj strani površine. Funkcija ovog dvostrukog sloja je da zaustavi dalji protok slobodnih nosioca sa jednog materijala na drugi [10].

Najjednostavniji primer električnog kontakta jeste kontakt između metala i vakuma. U slučaju kada su dva metala postavljena paralelno u vakuumu sa malim razmakom, trenutni protok električne stuje je zanemarljivo mali ukoliko je primenjen napon mali. Razlog za ovakvo ponašanje leži u činjenici da elektroni u metalu moraju da savladaju potencijalnu barijeru pre nego što mogu da napuste metal i uđu u vakuum. Ova potencijalna barijera između najviših energetskih nivoa elektrona u metalu (Fermijev nivo metala) i najnižeg energijskog nivoa elektrona u vakuumu (Vakuumski nivo) naziva se radna funkcija metala (eng. *work function*) ϕ_m predstavlja se formulom:

$$\phi_m = \zeta - E_{Fm} \quad (17)$$

gde je ζ - razlika potencijalnih energija elektrona između unutrašnjosti i spoljašnjosti metala.

Za definisanje različitih tipova električnih kontakta izabraćemo sistem metal-poluprovodnik-metal, pretpostavljajući da poluprovodnik sadrži nisku koncentraciju primesa, defektnih stanja i uvedenih elektrona. Predpostavićemo da su dve metalne elektrode identične. Pre uspostavljanja bliskog kontakta, radna funkcija metala je ϕ_m , dok je radna funkcija poluprovodnika ϕ , pri čemu ove dve funkcije nisu jednake. Nakon dovođenja u kontakt metala i poluprovodnika, dolazi do prenosa nanelektrisanja između elektrode i poluprovodnika, sve dok se ne izjednače Fermijev nivoi.

U zavisnosti od vrednosti ϕ_m, ϕ i drugih uslova razlikujemo nekoliko tipova električnih kontakata:

- Neispravljački ili Omski kontakt između metala i poluprovodnika definiše se kao kontakt sa zanemarljivo malim otporom (impedansom) u poređenju sa otporom poluprovodnika, pri čemu se podrazumeva da je gustina nanelektrisanja u metalu rezervoar nanelektrisanja. Jedna od glavnih manifestacija omskog kontakta je linearna strujno-naponska zavisnost pri niskim primjenjenim naponinima.
- Ispravljački ili Šotkijev kontakt nastaje u slučaju kada je $\phi_m > \phi$. Pod ovim uslovom elektroni, će se kretati od poluprovodnika ka metalu, ostavljajući prostorni region pozitivnog nanelektrisanja u poluprovodniku. Pod uticajem rastućeg napona, elektroni se mogu kretati u smeru od poluprovodnika ka metalu, dok je pri opadajućem naponu prolazak elektrona iz metala blokiran regionom pozitivnog nanelektrisanja, kojeg ima u znatno manjoj koncentraciji nego u unutrašnjosti poluprovodnika. U slučaju formiranja Šotkijeve barijere dolazi do odstupanja od linearног ponašanja strujno naponskih kriva. Povećanje napona daje elektronima mogućnost da dobijaju dovoljno veliku energiju da mogu preskočiti barijeru i nastaviti transport kroz poluprovodnik. Najčešće emisije elektrona iz metala kroz barijeru su termičke ili tunelirajuće prirode.
- Neutralni kontakti predstavljaju hipotetički tip kontakta koji se retko sreće u praksi. Reč neutralan odnosi se na oblasti bliske kontaktu koje su neutralne na obe strane. Da bi se zadovoljio uslov električne neutralnosti, potrebno je da nema prostornog nanelektrisanja i da se fermijevi nivoi u obe sredine idealno poklapaju.

3.4 Eksperimentalni uređaj za merenje poluprovodničkih svojstava

Analizator poluprovodničkih parametara Hewlett-Packard 4145A (slika 9), koji je korišćen u ovom radu, je programabilan automatski uređaj visokih performansi, namenjen merenju, analiziranju u grafičkom predstavljanju provodnih svojstava različitih tipova poluprovodnika u režimu jednosmernih struja. Uređaj omogućava ispitivanje dioda, bipolarnih tranzistora, tranzistora sa efektom polja, integrisanih kola itd. Glavne oblasti primene uključuju kompjuterski dizajn (CAD) integrisanih kola, procenu novih uređaja, ispitivanje materijala, odabir komponenti za dizajn električnih kola, kontrolu poluprovodničkih procesa i kontrolu kvaliteta. Opremljen je sa 4 programabilne stimulus/merne jedinice (SMU), dva programabilna izvora napona, dva monitora napona, interaktivnim grafičkim prikazom, upravljačkim dugmićima i raznim ulazno/izlaznim priključcima. Na slici 9 je prikazan korisnički interfejs Hewlett-Packard 4145A analizatora poluprovodničkih svojstava.

Za ispitivanje poluprovodničkih uređaja na raspolaganju je osam kanala, pri čemu su kanali od 1 do 4 za stimulus/merenje, kanali 5 i 6 su izvori napona, dok su kanali 7 i 8 monitri napona. Svaki SMU kanal ima tri operativna režima: naponsko-strujni monitor, strujno-naponski monitor i zajednički kanal. Struja ili napon se mogu držati konstantnim ili se menjati (linearno ili logaritamski). Ako se koristi kao naponsko-strujni monitor, svaki SMU se može programirati da kao rezultat daje napon od 0 V do ± 100 V u tri opsega: od 0 V do ± 19.99 V, od ± 20 V do 39.998 V i od ± 40 V do ± 100 V, sa rezulucijom

3. Električni transport u poluprovodničkim materijalima

od 1 mV, 2 mV i 5 mV respektivno. Ako se koristi kao strujno naponski monitor svaki SMU se može programirati da kao rezultat daje struje od $\pm 1 \text{ pA}$ do $\pm 100 \text{ mA}$ u devet mernih opsega sa maksimalnom rezolucijom od 1 pA u zavisnosti od opsega.

Uređaj je opremljen jedinicom za testiranje uzoraka 16058 A, koja je prikazana na slici 10. Jedinica se sastoji od zaštitne kutije, čija je uloga da zaštititi uzorak od elektromagnetskog zračenja i ambijentalnih uticaja. Postolje jedinice u gornjem levom uglu sadrži 4 SMU konekcije za kablove, koje se koriste za merenje strujno naponskih karakteristika. U gornjem desnom uglu se nalaze dve konekcije za programabilne izvore napona i dve konekcije za monitore napona. U sredini se nalaze pločice za testiranje tranzistora.

Ispitivanje biomornog poluprovodnika na bazi kalaj okisida je urađeno u mernoj konfiguraciji za diode, pri čemu je napon variran od -5 V do 5 V, a struja je merena u opsegu od $\pm 5 \text{ mA}$ do $\pm 100 \text{ mA}$, sa korakom od 0.5 V. Merenje strujno naponskih kriva je urađeno pri srednjem vremenu integracije.



Slika 9. Analizator poluprovodničkih parametara Hewlett-Packard 4145 A.



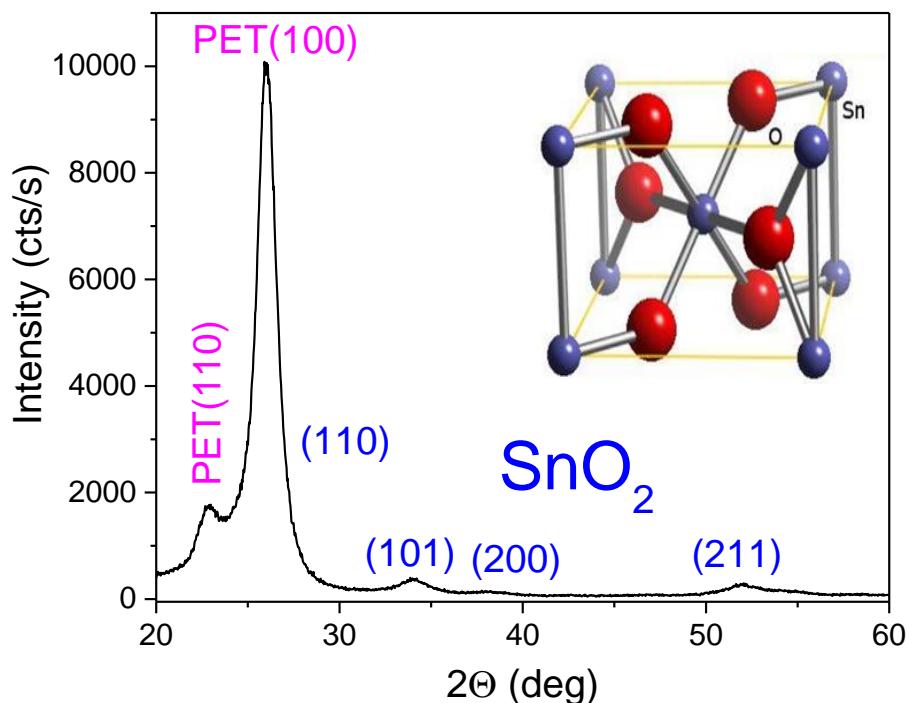
Slika 10. Jedinica za testiranje uzoraka 16058 A.

3. Rezultati i diskusija

Osnovni cilj ovog master rada je ispitivanje električnog transporta u biomorfnom poluprovodniku na bazi kalaj oksida. Prvi korak ka dostizanju cilja jeste sinteza poluprovodnog materijala koristeći polen crne jove kao šablon. Sledeći korak podrazumeva karakterizaciju strukturalnih, morfoloških i električnih svojstava sintetisanih uzoraka. Poslednji korak se sastoji od analize prikupljenih rezultata. Eksperimentalni rezultati, predstavljeni u ovom master radu, su grupisani prema predstavljenim koracima.

Eksperimentalne metode korišćene za ispitivanje uzorka su: skenirajuća elektronska mikroskopija (eng. *SEM*), spektroskopija energetski disperzivnih X-zraka (eng. *EDX*) i merenja poluprovodničkih svojstava u režimu jednosmernih struja. Pored navedenih tehnika, korišćene su i pomoćne tehnike kao što su: difrakcija rendgenskog zračenja (eng. *XRD*), Holova merenja (eng. *Hall effect*) i merenja impedanse u režimu naizmeničnih struja.

Jedna od najvažnijih eksperimentalnih tehnika za karakterizaciju novih materijala je difrakcija rendgenskog zračenja. Ova metoda predstavlja nezaobilazan alat u određivanju hemijskih i strukturalnih svojstava kristalnih, polikristalnih i nanokristalnih materijala. Na slici 12 je prikazan difrakcioni spektar u intervalu uglova 2θ od 20° do 60° , za sintetisani SnO_2 odštampan na PET (polietilen terafatalat) substratu. Difrakcione linije karakteristične za tetragonalnu rešetku SnO_2 su obeležene Milerovim indeksima (JCPDS card 21-1250). Na nižim uglovima u spektru domiriraju difrakcione linije koje potiču od PET substrata [12]. U sredini difrakcionog spektra dominiraju pikovi od tetragonalne rešetke kalaj oksida [5]. Veoma je važno napomenuti da u spektru nisu detektovane difrakcije koje potiču od neke druge strukture ili nečistoće.

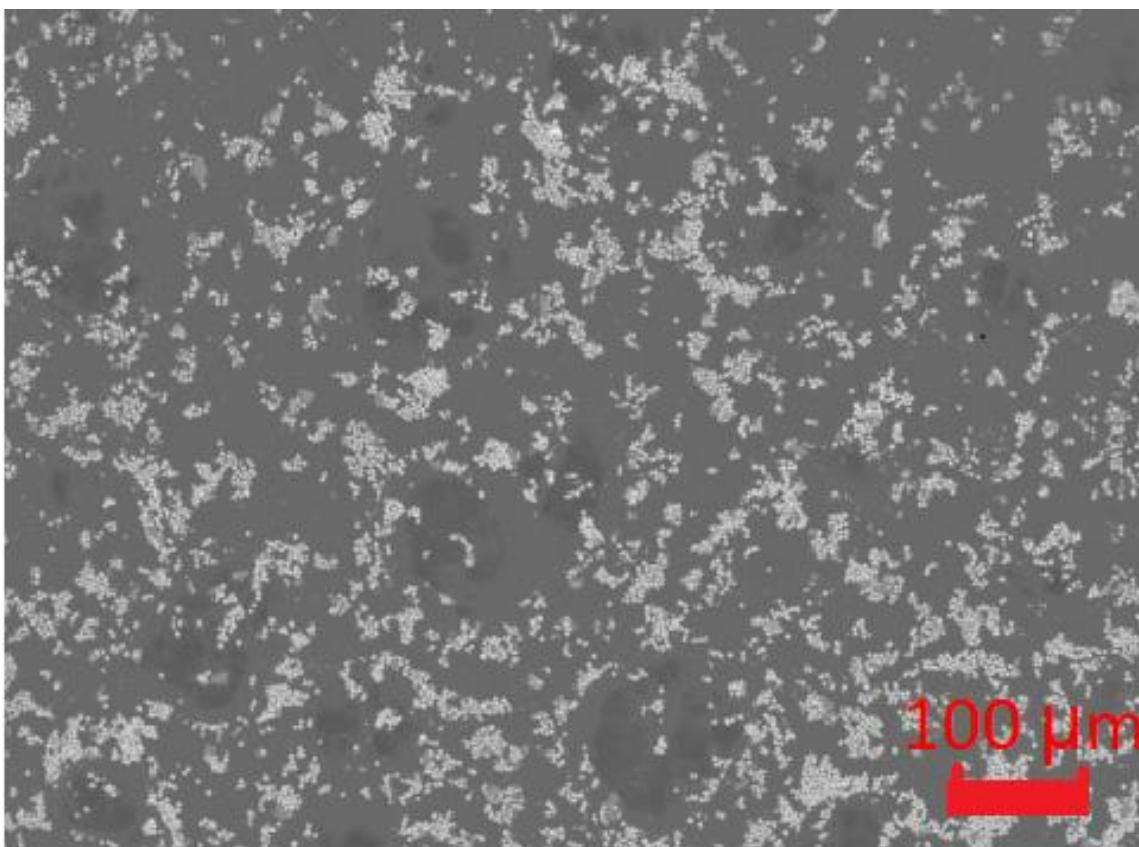


Slika 11. Difrakcioni spektar za sintetisani SnO_2 uzorak na PET substratu. U umetku slike je predstavljena tetragonalna kristalna rešetka SnO_2 .

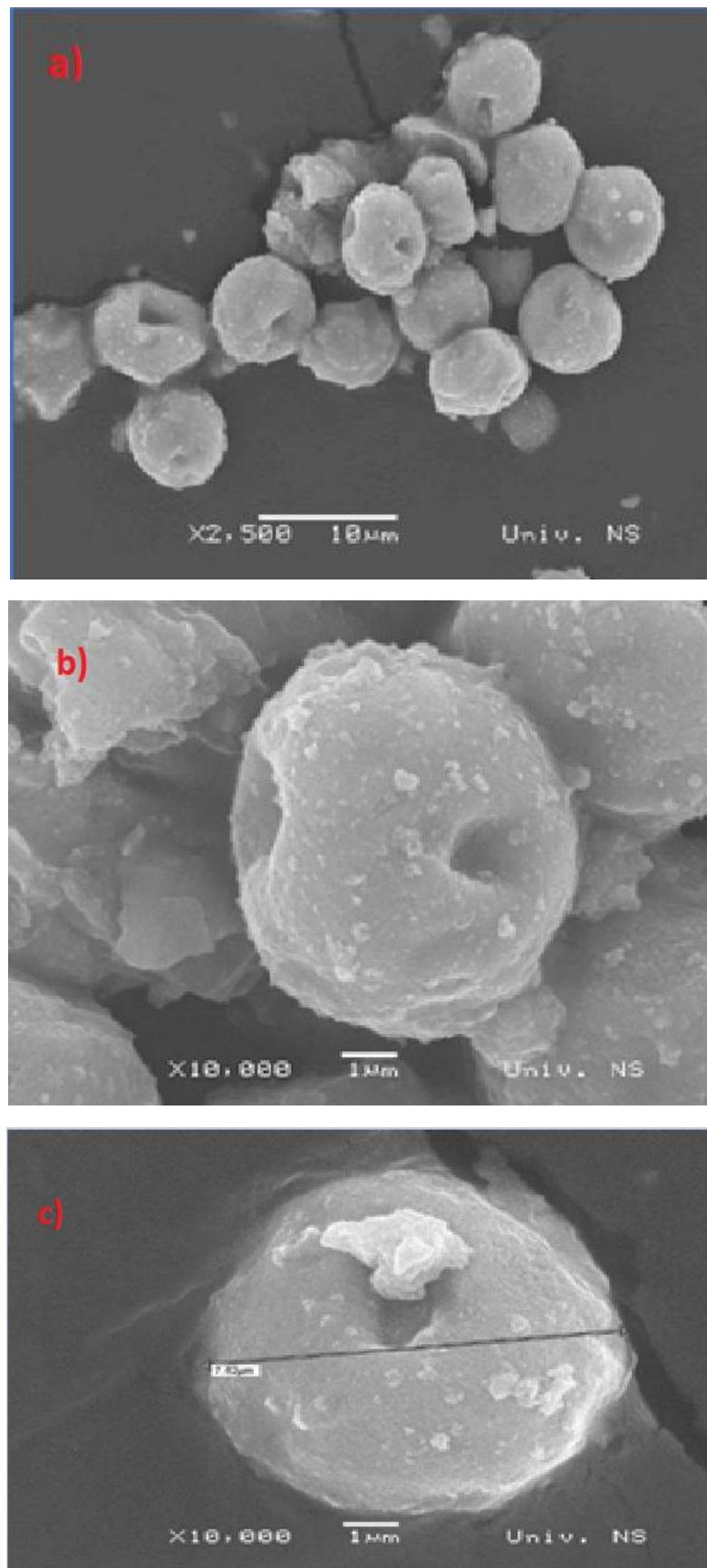
Profil difrakcionih linija nam nudi informacije o veličini kristalita, o mikronaprezanju i strukturnim defektima u rešetki [13]. Analizirajući izmereni spektar može se zaključiti da su difrakcione linije, karakteristične za kalaj oksid, dosta niskog intenziteta i dosta proširene. Dobijeni podaci ukazuju da postoji mikronaprazanje rešetke u sintetisanim uzorcima, odnosno da postoje strukturni defekti. Mnogobrojni literaturni podaci [14, 15, 16] ukazuju da su kiseonične vakancije i primesni atomi u vidu Sn^{3+} jona najčešći tip defekata koji se formira u kalaj oksidu, zbog čega pretpostavljamo da sintetisani uzorak ima defektну strukturu sa povećanom koncentracijom kiseoničnih vakancija.

Metodom skenirajuće elektronske mikroskopije omogućen je direktni uvid u oblik, veličinu i raspodelu sintetisanih čestica odnosno struktura. Na slici 12 prikazana je morfologija sintetisanog uzorka dobijena skenirajućom elektronskom mikroskopijom pri malom uvećanju, sa ciljem da se obuhvati što veća količina ispitivanog uzorka. Na osnovu predstavljenih rezultata možemo videti da se sintetisani uzorak odlikuje visokom homogenošću i da se sastoji od pretežno sfernih čestica, jednakih dimenzija. Prisustvo drugih čestica i nečistoća nije detektovano.

U saradnji sa Univerzitetskim centrom za elektronsku mikroskopiju Univerziteta u Novom Sadu, urađena su SEM merenja na sintetisanom uzorku koristeći JEOL JSM 6460 LV mikroskop. Rezultati merenja su prikazani na slici 13 a), b) i c). Na slikama jasno vidimo da je sintetisani SnO_2 u obliku čestica polena crne jove sa izraženom poroznošću. Na slici c) je prikazan izmereni dijametar čestice koji iznosi oko $8 \mu\text{m}$, što je nešto niža vrednost od nominalne vrednosti za prečnik čestica samog polena koji iznosi oko $10 \mu\text{m}$. Dobijeni rezultati pružaju potvrdu da smo koristeći prostu tehniku sinteze dobili biomorfni materijal koji ima oblik čestica polena.

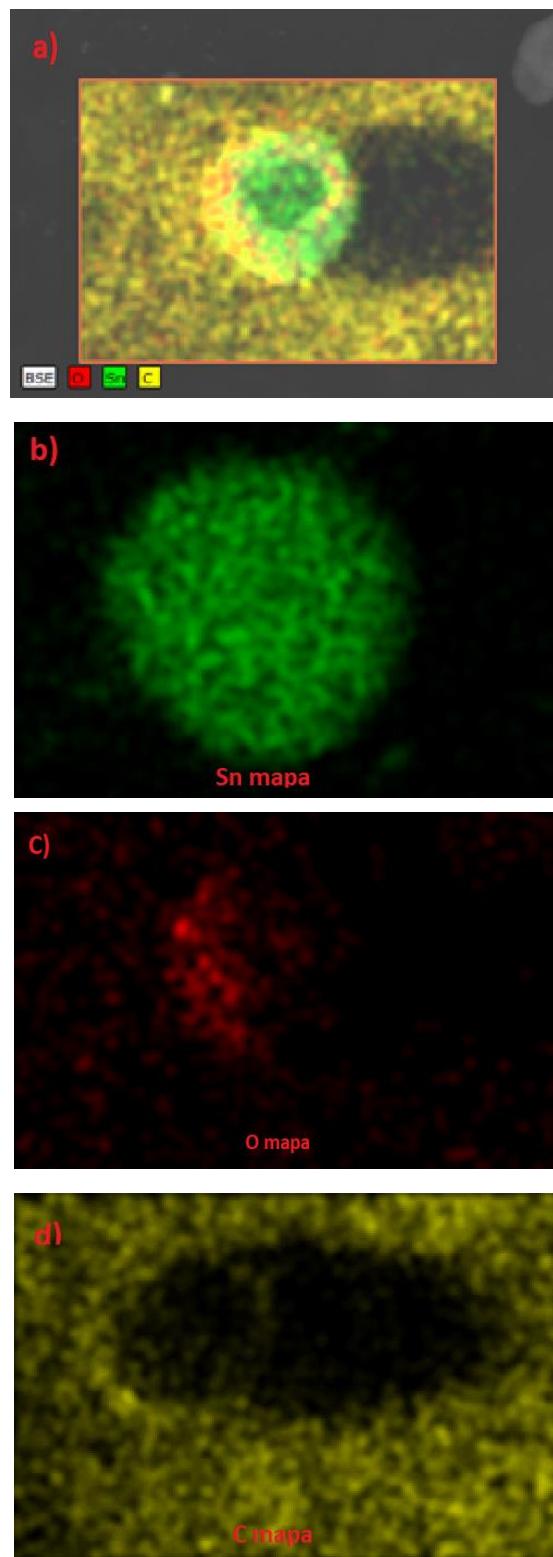


Slika 12. SEM slika sintetisanog biomorfnog poluprovodnika na bazi SnO_2 , izmerena pri malom uvećanju da bi se obuhvatila što veća količina ispitivanog materijala.



Slika 13. SEM karakterizacija morfologije sintetisanog biomorfnog SnO_2 pri uvećanju od a) 2500x, b) 10000x i c) 10000x sa naznačenim dijametrom individualne čestice.

Tehnika spektroskopije energetski disperzivnih X-zraka omogućava uvid u elementarnu kompoziciju proučavanog materijala i prostorno mapiranje elemenata. Na slici 14 a) prikazana je distribucija hemijskih elementata u individualnoj čestici biomornog SnO_2 . Na slici 14 b), c) i d) prikazane su mape raspodele Sn, O i C atoma.

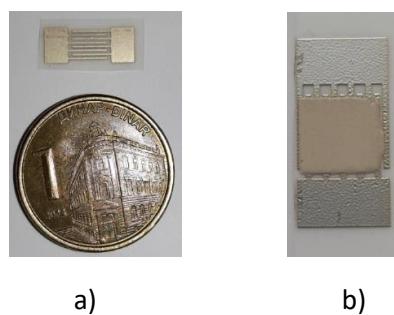


Slika 14. a) Kompletna elementalna mapa odnosno distribucija hemijskih elementata u individualnoj čestici biomornog SnO_2 , b) Mapa raspodele Sn atoma, c) Mapa raspodele O atoma i d) Mapa raspodele C atoma.

Mape distribucije elemenata na slici 14 b), c) i d) ukazuju da posmatrana čestica sadrži pretežno kalaj i kiseonik dok je distribucija ugljenika oko posmatrane čestice, jer je podloga na koju je čestica nanesena sačinjena od provodne ugljenične trake. Na slici 14 b) vidimo da je čestica izuzetno bogata kalajem i da je distribucija kalaja beznačajna mimo čestice. Na slici 14 c) vidimo da je distribucija kiseonika locirana pretežno na samoj čestici ali da nije u tolikoj koncentraciji kao Sn, što je u saglasnosti sa XRD rezultatima gde smo ustanovili prisustvo strukturnih defekata u sintetisanom materijalu u vidu kiseoničnih vakancija.

Nakon uspešne sinteze, neophodno je funkcionalizovati sintetisani materijal za ispitivanje električnog transporta. Prah kalaj oksida je dispergovan u funkcionalnu pastu sa ciljem da se odštampaju poluprovodnički filmovi na planarnim elektrodama pogodnim za električna merenja. Na slici 15 a) je prikazana Ag interdigitalna elektroda na PET substratu koja je korišćena za merenje električnog transporta, dok je na slici 15 b) prikazan odštampani film sa biomorfnim SnO_2 poluprovodnikom na interdigitalnim elektrodama. Debljina filma iznosi 90 μm .

Merenja Holovog efekta su urađena u saradnji sa Fakultetom tehničkih nauka u Novom Sadu na uređaju Ecopia HMS-3000. Merenja su urađena pri struci od 10 mA i u magnetnom polju od 0.37 T. Na osnovu merenja Holovog napona određen su tip, koncentracija i pokretljivost nosilaca nanelektrisanja. U tabeli 1 su upoređeni izmereni eksperimentalni rezultati sa literurnim vrednostima za različite morfologije kalaj oksida.



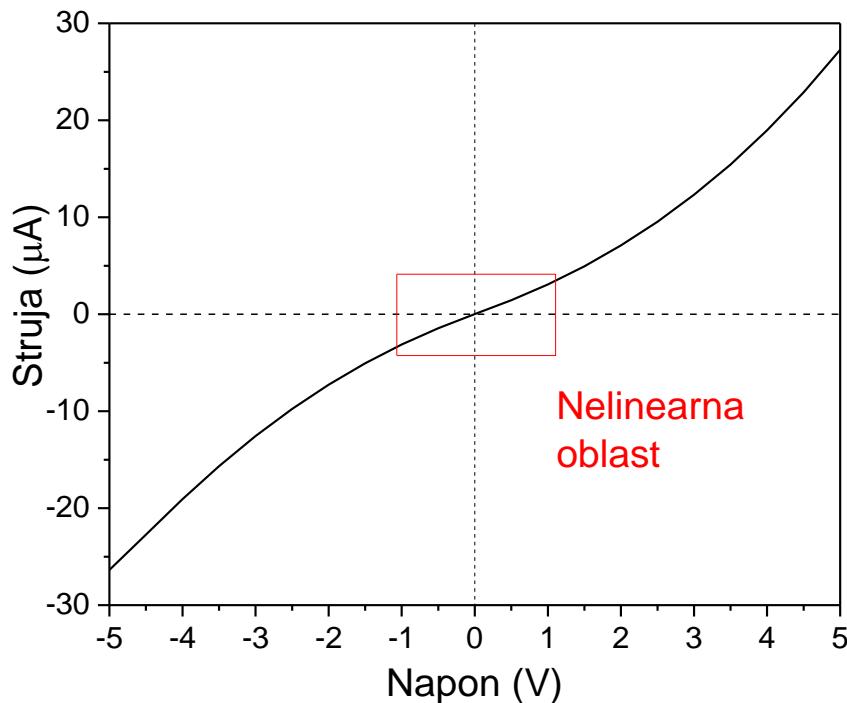
Slika 15. a) Prikaz Ag interdigitalne elektrode na PET substratu. Novčić od 1 dinara je prikidan za poređenje dimenzija. **b)** Odštampani film sa biomorfnim SnO_2 na interdigitalnim elektrodama.

Morfologija	Tip	Dopiranje	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	n_e ($1/\text{cm}^3$)	μ (cm^2/Vs)	Ref
monokristal	n-tip	/	ST	$1.1\text{-}1.5 \times 10^{17}$	185–240	[17]
polikristal	n-tip	/	550	$4.3\text{-}5.7 \times 10^{20}$	30.4 - 38.6	[18]
tanki film	n-tip	Cu, Al, In	ST	$10^{18} \text{-} 10^{20}$	6 - 16.5	[19]
tanki film	p-tip	In	500	$10^{12} \text{-} 10^{20}$	1.57 - 15.9	[20]
nano-film	n-tip	F	525	$0.98 \text{-} 4.71 \times 10^{20}$	10.96 - 17.5	[21]
Biomorfni	n-tip	/	ST	3.627×10^{10}	112	eksp

Tabela 1. Poređenje izmerenih eksperimentalnih vrednosti za koncentraciju nosilaca nanelektrisanja n_e i elektronske mobilnosti μ sa literurnim vrednostima za merenja Holovog efekta.

Na osnovu dobijenih rezultata merenja Holovog efekta, pokazalo se da sintetisani materijal predstavlja n-tip primesnog poluprovodnika, sa niskom koncentracijom slobodnih nosilaca nanelektrisanja i visokom mobilnošću. Upoređujući eksperimentalne rezultate sa literaturnim vrednostima [17-24], vidimo da ispitivani biomorfni poluprovodnik na bazi SnO_2 ima veoma nisku koncentraciju nosilaca nanelektrisanja. Mala koncentracija nosilaca nanelektrisanja u odnosu na većinu literaturnih podataka može biti zbog činjenice da nismo dopirali materijal i nismo unosili primesne atome koji mogu značajno povećati koncentraciju slobodnih nosilaca. Još jedan razlog može biti zbog sobne temperature na kojoj su merenja urađena u ovom radu, naspram većine rezultata iz literature gde su merenja Holovog efekta urađena na povišenim temperaturama. Iako biomorfni SnO_2 ima nisku koncentraciju nosilaca nanelektrisanja, njihova mobilnost u materijalu je veoma velika. Izmerena vrednost mobilnosti je nešto niža u odnosu na čist monokristal SnO_2 [17] i značajno viša u odnosu na polikristalni film [18] i nanostruktурне filmove [19, 22]. Velika mobilnost i mala koncentracija elektrona kojom se odlikuje biomorfni SnO_2 imaju veliki značaj za primenu ovih materijala u tehnologijama gde je potrebno brzo očitavanje i veliki opseg promene električne provodnosti.

Merenje električne provodnosti u režimu jednosmernih struja pri ambijentalnim uslovima prikazano je na slici 16, u vidu strujno naponske krive za biomorfni SnO_2 poluprovodnik, u opsegu napona od -5 V do 5 V. Na osnovu predstavljenih merenja možemo videti da ispitivani uzorak ima veoma nisku otpornost pri naponu od 5 V ($R=130 \text{ k}\Omega$), odnosno relativno visoku vrednost struje. Interesantno je napomenuti da su Kuang i saradnici [22] dobili veoma dobar odziv i linearnu strujno naponsku krivu u merenjima na jednoj izdvojenoj nanožici kalaj oksida. Ako uporedimo merenja sa literaturnim vrednostima možemo zaključiti da izmerene vrednosti struje svrstavaju biomorfni poluprovodnik na bazi SnO_2 u materijale pogodne za primenu u senzorskim tehnologijama jer se mogu meriti priručnim instrumentima kao što je unimer i nije potrebno koristiti dodatne pojačavače signala. Takođe je pogodan za primenu kao senzor u priručnim i mobilnim uređajima kao i daljinskom merenju i monitoringu, jer ispitivani materijal ima odličnu vrednost struje na naponu od 5 V, na kojem radi veliki broj baterija.



Slika 16. Strujno naponska kriva za biomorfni SnO_2 , izmerena pri ambijentalnim uslovima.

Možemo uočiti na slici 16 da je strujno naponska kriva uglavnom linearna, osim na niskim vrednostima napona. Odstupanje od linearne ponašanja ukazuje da nije ostvaren omski kontakt između elektrode i SnO₂ poluprovodnika, odnosno da imamo formiranje Šotkijeve barijere u M-P spoju. Veliki broj istraživanja je posvećen opisu električnog transporta kroz Šotkijevu barijeru, uzimajući u obzir efekte termičke emisije i tuneliranja. Električni transport kroz ovakvu barijeru se opisuje pomoću nekoliko različitih modela [23]:

- Šotkijev model: $I_S = A_S T^2 e^{\left[\frac{1}{kT} (q\Phi - q\sqrt{\frac{qV}{4\pi\epsilon_0\epsilon_d}}) \right]}$ (18)

- Frovler-Nojndhamov model: $I_{FN} = A_{FN} V^2 e^{\left[\frac{-4d\sqrt{2m} \sqrt[3]{q\Phi}}{3q\hbar V} \right]}$ (19)

- Frenkel-Pol model: $I_{FP} = A_{FP} VT^2 e^{\left[\frac{q\Phi - 2q\sqrt{\frac{qV}{\pi\epsilon_0\epsilon_d}}}{2kT} \right]}$ (20)

- Direktno tuneliranje: $I_{DT} = A_{DT} V e^{\left[\frac{-4\pi\sqrt{2m\Phi}}{\hbar} \right]}$ (21)

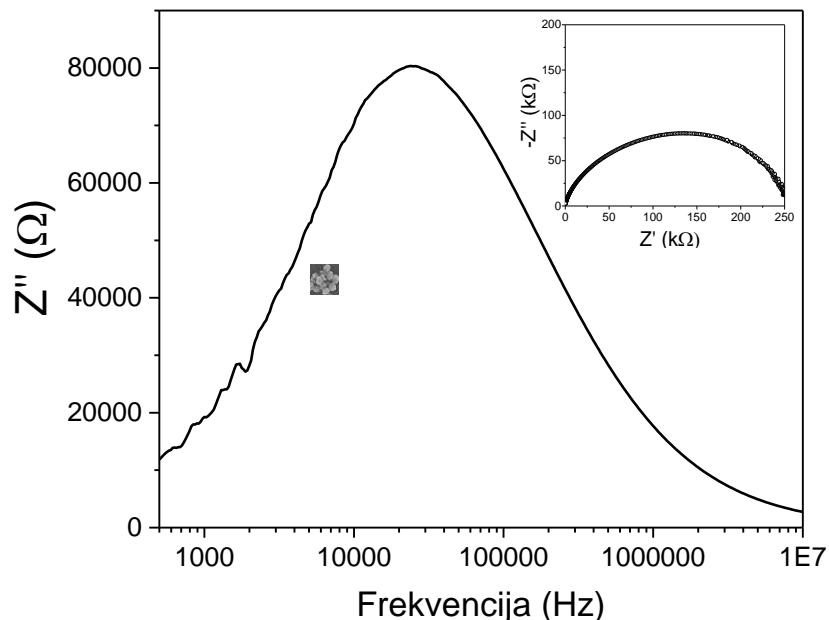
- Model preskakanja (eng. *Hopping*): $I_H = A_H V e^{(-\frac{\Delta E}{kT})}$ (22)

U navedenim modelima važi: A_x - konstanta proporcionalnosti, V - primjenjen napon, T - temperatura, q - nanelektrisanje elektrona, m - masa elektrona, \hbar - Plankova konstanta, k - Bolcmanova konstanta, ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuma, ϵ - dielektrična konstanta poluprovodnika, Φ - energijska barijera ili energija aktivacije barijere [23]. Pomoću ovih modela je moguće objasniti uočeno odstupanje od linearnosti u strujno naponskim krivama. Međutim, numeričko modelovanje eksperimentalnih rezultata prevazilazi obim master rada, zbog čega su modeli navedeni sa ciljem da se ukaže da pojma električnih kontakata, iako zvuči prosto, sa sobom nosi veliku fizičku i tehnološku težinu.

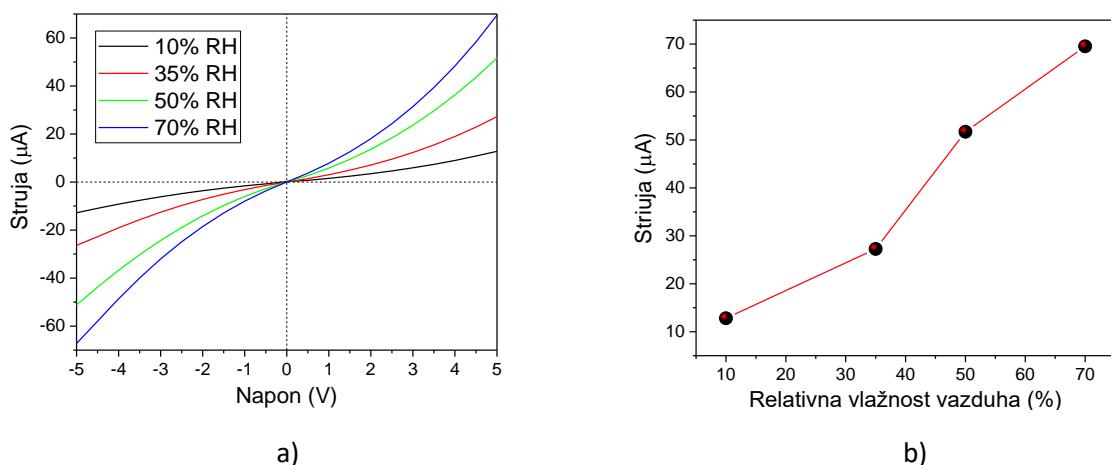
Pored ispitivanja doprinosa slobodnog nanelektrisanja u režimu jednosmernih struja ispitvane su performanse sintetisanog materijala u režimu naizmeničnih struja. Kao što je navedeno u poglavlju 3.2, električna merenja u režimu naizmeničnih struja pružaju komplementarne informacije karakterizaciji transportnih svojstava poluprovodnika i omogućavaju dublji uvid u prirodu električne provodnosti. Na slici 17 su prikazana impedansna merenja urađena u na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na uređaju HP4149 A u opsegu frekvencija od 500 Hz do 1 MHz. Na slici 17 je prikazana zavisnost imaginarnog dela impedanse od frekvencije, koja nam omogućava direktnu vizuelizaciju broja relaksacionih procesa u materijalu, pri čemu svaki pik odgovara individualnoj relaksaciji. U gornjem desnom umetku slike je prikazan Kol-Kol (Cole-Cole) grafik [11], a u donjem umetku je prikazan isečak SEM slike biomorfnih SnO₂ čestica. Na grafiku vidimo da postoji samo jedan dominantan pik na 25.8 kHz, koji se kod zrnastih materijala kao što je sintetisani SnO₂, može pripisati doprinosu granice zrna električnoj provodnosti [25]. Tanki površinski sloj čestice kod oksidnih materijala se naziva granica zrna i odlikuje se velikom koncentracijom defekata kao što su kisenične vakancije. Ovi defekti utiču na nagomilavanje dodatnog nanelektrisanja površinskom sloju [25]. Kod susednih biomorfnih čestica SnO₂ koje su u neposrednom kontaktu kao što je prikazano na SEM slici u donjem umetku slike 17, lokalizovano nanelektrisanje u površinskom sloju dovodi do formiranja Kulonove odbojne sile odnosno Kulonove barijere koja remeti električni transport kroz materijal. Kako je ovo nanelektrisanje prostorno lokalizovano odnosno vezano, ono dovodi do pojave relaksacionog pika u spektru na slici 17. U gornjem umetku vidimo takozvani Kol-Kol grafik koji sadrži jednu polukružnicu [11]. Postojanje samo jedne polukružnice takođe ukazuje da granica zrna ima dominantan uticaj na elektronski transport u režimu naizmeničnih struja [25].

Presek kružnice sa Z' osom je u koordinatnom početku što direktno ukazuje da nemamo doprinos samog zrna relaksacionim procesima. Merenja impedanse otkrivaju jedan od fundamentalnih mehanizama koji stoji iza transportnih svojstava biomorfnog SnO_2 poluprovodnika.

Jedan od veoma bitnih faktora koji utiču na transportna svojstva poluprovodnika je relativna vlažnost vazduha u kojoj se posmatrani uzorak nalazi. Zbog toga je ispitivan uticaj promene vlažnosti sredine na strujno naponske karakteristike biomorfnog SnO_2 . Relativna vlažnost vazduha je kontrolisana u nekoliko tačaka: 10 % (referentna vlažnost), 35 % (ambijentalni uslovi), 50 % i 70 % (visoka vlažnost). Na slici 18 a) su prikazane strujno naponske krive za ispitivane vrednosti relativne vlažnosti vazduha za biomorfni SnO_2 a na slici 18 b) je prikazana promena maksimalne vrednosti struje sa procentima relativne vlažnosti vazduha.



Slika 17. Karakterizacija strujne provodnosti u režimu naizmeničnih struja. Grafik zavisnosti imaginarnog dela impedanse od frekvencije za biomorfni SnO_2 . U umetku je prikazan Cole-Cole grafik određen na osnovu merenja impedanse [11].



Slika 18. a) Strujno naponske krive za biomorfni SnO_2 poluprovodnik u zavisnosti od relativne vlažnosti vazduha. **b)** Promena maksimalne vrednosti struje sa relativnom vlažnošću vazduha.

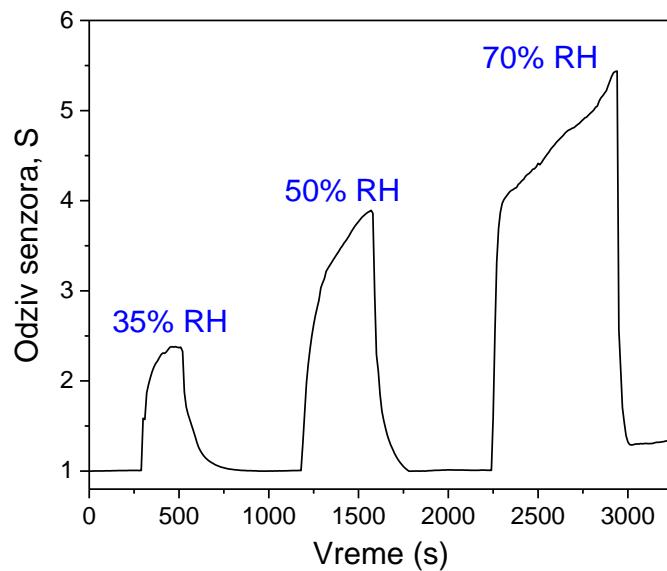
Uticaj vlažnosti daje značajan doprinos transportnim svojstvima u biomorfnom SnO₂. Za nisku vlažnost vazduha promena struje nije drastična. Međutim, u uslovima visoke vlažnosti, dolazi do značajnog porasta struje. Uočeno ponašanje ukazuje da se ispitivani uzorak može primenjivati kao elektrohemski senzor vlažnosti vazduha. Odziv senzora predstavlja jedan od osnovnih parametara za procenu performansi poluprovodničkih senzora i definiše se izrazom:

$$S = \frac{I_r}{I_m} . \quad (22)$$

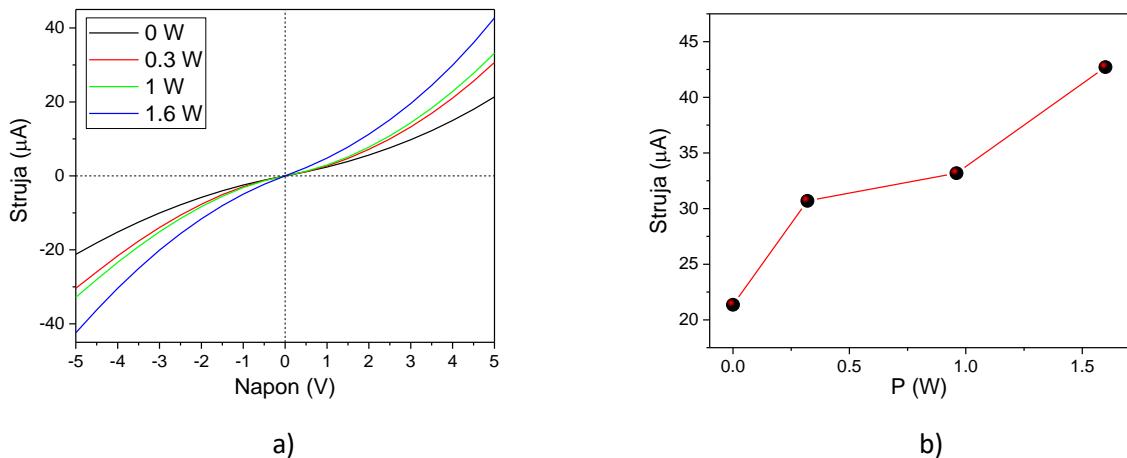
S predstavlja odnos struje u referentnoj vlažnosti (I_r) prema struci u merenoj vlažnosti (I_m).

Na slici 19 je prikazana vremenska zavisnost odziva senzora na promenu relativne vlažnosti vazduha. Na osnovu slike 19 vidimo da je uticaj relativne vlažnosti vazduha dramatičan za visoke vrednosti RH dok za niske vrednosti imamo očekivane promene odziva senzora. Takođe, vreme dostizanja maksimalne vrednosti struje (vreme odziva) i vreme vraćanja na referentni nivo (vreme oporavka) je daleko kraće za niže vrednosti RH u odnosu na visoke vrednosti vlažnosti vazduha, 70% RH. Nakon ispitivanja na visokoj vlažnosti od 70% RH vidimo da se odziv senzora nije vratio na referentni nivo. Ovakvo ponašanja ukazuje da je određena količina vode ostala apsorbovana na površini uzorka. Potrebno je istaći da se veoma visoke vlažnosti vazduha (RH > 50%), koje smo ispitivali u ovom radu, ne sreću često u realnim uslovima, tako da je ispitivani senzor pokazao dobre karakteristike i u ekstremnim slučajevima. Vrednosti odziva su u dobroj saglasnosti sa literaturnim vrednostima [26, 27, 28], pri čemu postoji dosta prostora za dalje unapređenje performansi. Obrađeni rezultati otvaraju mogućnost primene sintetisanog SnO₂ u senzorskim tehnologijama za monitoring relativne vlažnosti vazduha.

Veoma bitan faktor koji može uticati na transportna svojstva biomorfnog poluprovodnika na bazi SnO₂ je svetlost iz optičkog spektra. Uticaj svetlosti na strujno naponske krive ispitivan je pomoću svetlosno emitujuće diode (eng. *LED*) čija je emisija na 520 nm, koja je pobuđivana sa nekoliko različitih snaga (P₁= 0,3 W, P₂= 1 W i P₃= 1,6 W). Na slici 20 a) su prikazane strujno naponske krive za biomorfni SnO₂ pod dejstvom različitih snaga svetlosti. Na slici 20 b) je prikazana varijacija struje u zavisnosti od snage na diodi.



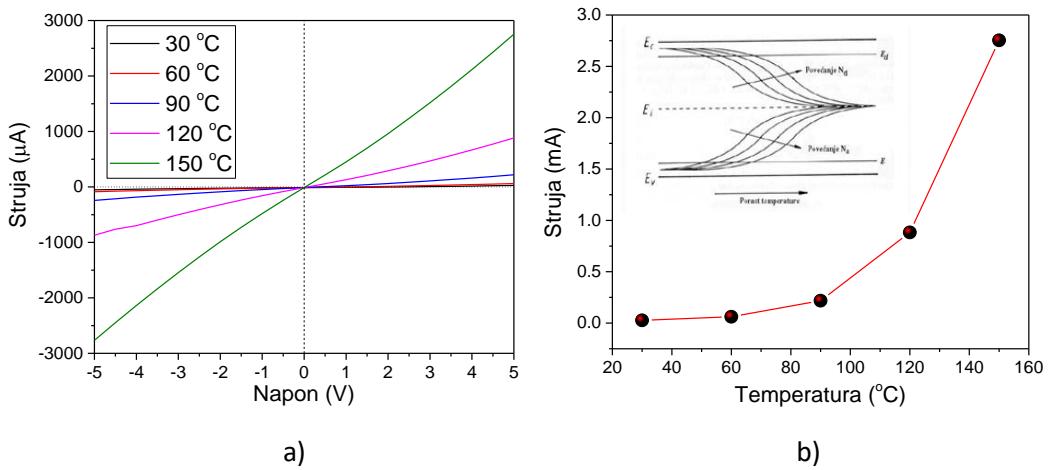
Slika 19. Vremenska zavisnost promene odziva senzora sa promenom relativne vlažnosti vazduha za elektrohemski senzorna bazi biomorfnog SnO₂.



Slika 20. a) Zavisnost strujno naponskih kriva od jačine svetlosti za biomorfni SnO_2 poluprovodnik.
b) Varijacija vrednosti struje sa snagom P primjenjenog zračenja.

Analizom dobijenih rezultata možemo zaključiti da svetlost iz središnjeg dela optičkog spektra, na talasnoj dužini zelene svetlosti, ima određen uticaj na vrednost struje u proučavanom filmu na bazi biomornog kalaj oksida. Energija fotona, na kojoj izabrana elektoda emituje svetlost, je dosta manja od vrednosti energetskog procepa SnO_2 (3,6 eV) [7]. Energija fotona kojom smo ispitvali materijal na bazi SnO_2 poluprovodnika nije dovoljna da pobudi elektrone iz valentne zone u provodnu, već može da pobudi elektrone iz valentne zone u neki virtualni nivo u zabranjenoj zoni kao i elektrone iz primesnih nivoa u provodnu zonu. Sa povećanjem snage zračenja dolazi do blagog porasta indukovane struje, a sam profil I (V) kriva se ne menja kvalitativno, što znači da svetlosna pobuda ne utiče na prirodu električnog transporta kroz Šotkijevu barijeru. Detektovana promena struje pod dejstvom svetlosti može se pripisati optičkoj apsorpciji koja potiče od defektnih elektronskih stanja odnosno od kiseoničnih vakancija. Vakancije kao primeće stvaraju elektronska stanja u blizini valentne zone, pri čemu energija fotona može pobuditi prelaz elektrona i dovesti do povećanja struje.

Temperaturni uticaj na transportna svojsta poluprovodnika predstavlja jedan od najdominantnijih faktora koji mogu promeniti performanse ovih materijala, kao što je opisano u poglavlju 3.2. Ispitivanje temperaturskog tretmana je izvršeno na temperaturama 30 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C i 150 °C. Na slici 21 a) su prikazane strujno naponske krive izmerene na zadatim temperaturama, a na slici 21 b) je prikazana zavisnost struje od temperature. Temperaturski tretman na 150 °C dovodi do promene profila strujno naponske krive, pri čemu kriva postaje linerna i u oblasti niskih napona (ispravljanje Šotkijeve barijere). Prema slici 21 b) vidimo da zagrevanje SnO_2 poluprovodnika do 100 °C ne utiče drastično na vrednost izmerene struje. Grejanje na temperature veće od 100 °C dovodi do naglog rasta struje usled termičkog aktiviranja provodnosti [29]. Sa porastom temperature elektroni iz valentne zone kao i elektroni u donorskim nivoima dobijaju sve veću energiju i mogu da preskoče u provodnu zonu, kao što je prikazano u umetku slike 21 b) [30]. Za opisivanje procesa termičkog aktiviranja provodnosti uvodi se pojam energije aktivacije. Energija aktivacije je energija koja je potrebna elektronu da savladala potencijalnu barijeru i dovrši proces električnog transporta. U većini slučajeva energija aktivacije odgovara rastojanju između Fermijevog nivoa (najviši zauzeti nivo energije) i provodne zone. Termalno aktivirani elektroni direktno utiču na porast struje zbog čega se za primenu u tehnologiji gasnih senzora poluprovodnički materijali na bazi SnO_2 greju u toku procesa detekcije gasa.



Slika 21. a) Zavisnost strujno naponskih kriva od promene temperature za biomorfni SnO_2 poluprovodnik. **b)** Varijacija maksimalne vrednosti struje sa temperaturom. U umetku je prikazan uticaj temperature na koncentraciju nosilaca nanelektrisanja [30].

5. Zaključak

U ovom master radu su ispitivana električna transportna svojstva biomorfnih poluprovodnika na bazi kalaj oksida. Uzorci SnO_2 su sintetisani koristeći polen crne jove kao šablon, sa ciljem da se prirodne strukture kao i prirodni oblici primene u inžinjerstvu poluprovodnika i da se analiziraju efekti koji stoje iza električne provodnosti u ovim inovativnim materijalima.

Karakterizacija strukturnih, morfoloških i hemijskih svojstava sintetisanog uzorka je urađena koristeći XRD, SEM i EDX tehnike. Ispitivanje strukturnih svojstava biomorfnog SnO_2 XRD tehnikom je pokazalo da sintetisani materijal ima rutilnu tetragonalnu kristalnu strukturu sa značajnom koncentracijom defekata. Rezultati SEM merenja su pokazali da se sintetisani materijal sastoji od uniformnih i veoma poroznih čestica SnO_2 u obliku zrna polena jove, čiji je dijametar oko $8 \mu\text{m}$. Analiza elemetarnog sastava i distribucija hemijskih elemenata u individualnoj čestici sintetisanog SnO_2 , pomoću EDX tehnike je pokazala da se posmatrana čestica sastoji od Sn i O atoma, što potvrđuje XRD rezultate.

Funkcionalizacija sintetisanog materijala na fleksibilnom PET substratu je urađena tehnikom sito-štampe. Električni kontakti su takođe izrađeni tehnikom sito-štampe u konfiguraciji interdigitalnih elektroda, koristeći komercijalnu Ag pastu. Povrh interdigitalnih elektroda je odštampan film sa sintetisanim SnO_2 poluprovodnikom, debljine $90 \mu\text{m}$.

Ispitivanje električnog transporta u filmovima na bazi biomorfnog SnO_2 poluprovodnika je urađeno u režimu jednosmernih i naizmeničnih struja, sa ciljem da se odredi doprinos slobodnih i vezanih nosilaca nanelektrisanja. Rezultati merenja Holovog efekta su pokazali da sintetisani materijal predstavlja n-tip primesnog poluprovodnika, sa niskom koncentracijom slobodnih nosilaca nanelektrisanja i visokom mobilnošću. Merenja strujno naponskih kriva, pri ambijentalnim uslovima, su potvrdila rezultate Holovog efekta, pri čemu je ustanovljeno da sintetisani poluprovodnik ima odstupanje od linearne zavisnosti struje od primjenjenog napona, za male vrednosti napona gde je detektovano formiranje Šotkijeve barijere. Merenja transportnih svojstava u režimu naizmeničnih struja je pokazalo da ključni doprinos električnoj otpornosti na povišenim frekvencijama potiče od relaksacionog procesa karakterističnog za model granice zrna. Zbog široke mogućnosti primene biomorfnog SnO_2 u savremenim senzorskim tehnologijama ispitivan je uticaj ambijentalnih faktora, poput relativne vlažnosti vazduha, svetlosti i temperature na strujno naponske krive. Dominantan uticaj na vrednost izmerene struje ima temperaturski tretman gde je ustanovljeno da grejanje preko 100°C dovodi do dramatičnog porasta struje. Povećanje relativne vlažnosti vazduha takođe ima značajan uticaj na porast struje, dok promena snage svetlosti na talasnoj dužini od 520 nm ima najmanje uticaja na transportna svojstva.

Sumirajući dobijene rezultate, može se istaći da multidisciplinarni pristup razvoju poluprovodničkih materijala otvara mogućnosti za značajan razvoj fundamentalne nauke kao i za razvoj novih tehnologija, proizvoda i tržišta. Kombinovanjem biologije, hemije i nauke o materijalima, dizajnirani su poluprovodnici sa jedinstvenom morfologijom, strukturnim i električnim svojstvima. Kombinovanjem fizike i elektrotehnike, moguće je sagledati osnovna svojstva ispitivanog poluprovodnog materijala i iskoristiti ta svojstva u senzorskim tehnologijama.

6. Literatura

1. M. McCarty, Life of bionics founder a fine adventure, Dayton Daily News (2019); Y. Xia, W. Zhang, H. Huang, Y. Gan, Y. Xiao, L. Qiuhan, X. Tao, Biotemplating of photosphate hierarchical rechargeable LiFePO₄/C spirulina microstructures, *Journal of Materials Chemistry* **21** (2011) 6498.
2. F. Song, H. Su, J. Han, W. M. Lau, W. J. Moon, D. Yhang, Bioinspired Hierarchical Tin Oxide Scaffolds for Enhanced Gas Sensing Properties, *Journal of Physical Chemistry C* **116** (2012) 10274-10281; A. A. Fazil, J. U. Bhanu, A. Amutha, S. Joicy, N. Ponpandian, S. Amirthapandian, B. K. Panigrahi, P. Thangadurai, A facile bio-replicated synthesis of SnO₂ motifs with porous surface by using pollen grains of *Peltophorum pterocarpum* as a template, *Microporous and Mesoporous Materials* **212** (2015) 91-99.
3. D. Wang, S. Liu, M. Shao, J. Zhao, Y. Gu, Q. Li, X. Zhang, J. Zhai, J. Fang, Aqueous solution-processed multifunctional SnO₂ aggregates for highly efficient dye-sensitized solar cells, *Chem. Res.* **57** (2018) 7163-7145; Z. H. Bakr, Q. Wali, J. Ismail, N. K. Elumalai, A. Uddin, R. Jose, Synergistic combination of electronic and electrical properties of SnO₂ and TiO₂ in a single SnO₂-TiO₂ composite nanofiber for dye-sensitized solar cells, *Electrochim. Acta* **263** (2018) 524-532; V. Ghodsi, P. V. Radovanovic, Turning weakly luminescent SnO₂ Nanocrystals into tunable and efficient light emitters by aliovalent alloying, *Chem. Mater.* **30** (2018) 3578-3587; H. Huang, M. Ng, Y. Wu, L. Kong, Solvothermal synthesis of Sb: SnO₂ nanoparticles and IR shielding coating for smart window, *Materials & Design* **88** (2015) 384-389.
4. S. Chappel, A. Zaban, Nanoporous SnO₂ electrodes for dye-sensitized solar cells: improved cell performance by the synthesis of 18 nm SnO₂ colloids, *Els* **71** (2002) 141–152; A. Gopal, K. Hoshino, S. Kim, X. Zhang, Multi-color colloidal quantum dot based light emitting diodes micropatterned on silicon hole transporting layers, *Nanotechnology* **20** (2009) 235201; T. Minami, Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes, *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) 35.
5. A. A. Bolzan, C. Fong, B. J. Kennedy, C. J. Howard, Structural Studies of rutile-type metal dioxides, *Acta Crystallogr. Sect. B-Struct. Sci.* **53** (1997) 373.
6. M. A. Mäki-Jaskari, T. T. Rantala, Band structure and optical parameters of the SnO₂ (110) surface, *Phys. Rev. B* **64** (2001) 075407.
7. P. D. Borges, L. M. R. Scolfaro, H. W. Leite Alves, E. F. Da Silva Jr, DFT study of the electronic, vibrational, and optical properties of SnO₂, *Theor. Chem. Acc.* **126** (2010) 39–44.
8. A. Svane, E. Antoncik, Electronic Structure of rutile SnO₂, GeO₂ and TeO₂, *J. Phys. Chem. Solids* **48** (1987) 171-180.
9. Y. Mi, H. Odaka, S. Iwata, Electronic Structures and Optical Properties of ZnO, SnO₂ and In₂O₃, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 3453–3458.
10. S. O. Kasap, “Principles of Electronic Materials and Devices” (McGrow Hill education, 4th edition, New York, 2006).
11. K. C. Kao, “Dielectric phenomena in solids” (Elsevier Academic Press, San Diego, USA, 2004).
12. S. H. Gao, Y. T. Han, F. X. Li, J. Yan, Y. H. Lu, H. D. Zheng, Structure and properties of polyethylene terephthalate treated by supercritical CO₂ thermal science, **22** (2018) 1645-1650.
13. V. K. Pecharsky, P. Y. Zavalij, Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials, Springer Science+Business Media, Inc. (2003).
14. M. K. Paria, H. S. Maiti, Electrical conductivity and defect structure of polycrystalline tin dioxide doped with antimony oxide. *J Mater Sci.* **17** (1982) 3275–3280.

15. K. G. Godinho, A. Walsh, G. W. Watson, Energetic and Electronic Structure Analysis of Intrinsic Defects in SnO₂, *J. Phys. Chem. C* **113** (2009) 439–448.
16. Y. Yang, Y. Wang, S. Yin, Oxygen vacancies confined in SnO₂ nanoparticles for desirable electronic structure and enhanced visible light photocatalytic activity, *Applied Surface Science* **420** (2017) 399-406.
17. M. Nagasawa, S. Shionoya, S. Makishima, Vapor Reaction Growth of SnO₂ single crystals and their properties, *J. Appl. Phys.* **4** (1965) 195.
18. A. Fujisawa, T. Nishino, Y. Hamakawa, Hall-Effect Measurement on Polycrystalline SnO₂ Thin Films, *J. Appl. Phys.* **27** (1988) 552-555.
19. S. Gurakar, T. Serin, Comprehensive structural analysis and electrical properties of (Cu, Al and In)-doped SnO₂ thin films, *Materials science & engineering B* **251** (2019) 11445.
20. Z. Ji, Z. He, Y. Song, K. Liu, Z.Z. Ye, Fabrication and characterization of indium-doped p-type SnO₂ thin films, *Journal of Crystal Growth* **259** (2003) 282-285.
21. A. A. Yadav, E. U. Masumdar, A. V. Moholkar, M. Neumann-Spallart, K. Y. Rajpure, C. H. Bhosale, Electrical, structural and optical properties of SnO₂: F thin films: Effect of the substrate temperature, *Journal of Alloys and Compounds* **488** (2009) 350-355.
22. Q. Kuang, C. Lao, Z. L. Wang, Z. Xie, L. Zheng, High-Sensitivity humidity sensor based on a single SnO₂ nanowire, *JACS communications* (2007).
23. K. Araki, H. Endo, H. Tanaka, T. Ogawa, Multi-Curve Fitting Analzsis of Temperature-Dependent I-V Curves of Poly-Hexathienylphenanthroline-Bridged Nanogap Electrodes, *Japanese Journal of Applied Physics* **43** (2004) L634.
24. C. Agashe, M. G. Takwale, V. G. Bhide, S. Mahamuni, S. K. Kulkarni, Effect of Sn incorporation on the growth mechanism of sprayed SnO₂ films, *Journal of Applied Physics* **70** (1991) 7382; K. Y. Rajpure, M. N. Kusumade, M. N. Neumann- Spallart, C. H. Bhosale, Effect of Sb doping on properties of conductive spray deposited SnO₂ thin films, *Materials Chemistry and Physics* **64** (2000) 184-188; D. J. Goyal, C. Agashe, B. R. Marathe, M. G. Takwale, V. G. Bhide, Effect of dopant incorporation on the structural and electrical properties of sprayed SnO₂ films: Sb films, *Journal of Applied Physics* **73** (1993) 7520; H. K. Hassun, B. H. Hussein, E. M. T. Salman, A. H. Shaban, Photoelectric properties of SnO₂: Ag/P-Si heterojunction photodetector, *Energy Reports* **6** (2020) 46-54 ; I. Saadeddin, H. S. Hilal, B. Pecquenard, J. Marcus, A. Mansouri, C. Labrugere, M. A. Subramanian, G. Campet, Simultaneous doping of Zn and Sb in SnO₂ ceramics: Enhancement of electrical conductivity, *Solid State Science* **8** (2006) 7-13.
25. W. B. H. Othmen, Z. B. Hamed, B. Sieber, A. Addad, H. Elhouichet, R. Boukherroub, Structural and optical characterization of p-type highly Fe-doped SnO₂thin films and tunnelling transport on SnO₂: Fe/p-Si heterojunction, *Journal Applied Surface Science* **434** (2018) 879-890.
26. S. K. Shukla, R. P. Rastogi, N. B. Singh, Nanosize SnO₂ through nitrate eutectic mixture for humidity sensors, *Emerg. Mater. Res.* **4** (2015) 12–17.
27. A. S. Ismail, M. H. Mamat, M. F. Malek, M. M. Yusoff, R. Mohamed, N. D. Md, A. Sin, B. Suriani, M. Rusop, Heterogeneous SnO₂/ZnO nanoparticulate film: Facile synthesis and humidity sensing capability, *Materials Science in Semiconductor Processing* **81** (2018) 127–138.
28. D. Toloman, A. Popa, M. Stan, C. Socaci, A. R. Biris, G. Katona, F. Tudorache, I. Petriță, F. Iacomi, Reduced graphene oxide rajpure with Fe doped SnO₂ nanoparticles for humidity sensor, *Applied Surface Science* **402** (2017) 410–417.
29. A. Oprea, E. Moretton, N. Barsan, W. J. Becker, J. Wollenstein, Conduction model of SnO₂ thin films based on conductance and Hall effect measurements, *J. Appl. Phys.* **100** (2006) 033716.
30. Č. Kitel, "Uvod u fiziku čvrstog stanja" (Savremena administracija, Beograd, 1970).

UNIVERZITET U NOVOM SADU

PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Sonja Stefanović

AU

Mentor:

Mentor 1: dr Marko Radović, naučni saradnik, Institut Biosens, Univerzitet u Novom Sadu.

MN

Mentor 2: dr Vesna Benigin, redovni profesor, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.

Naslov rada:

“Električni transport u biomorfnom poluprovodniku na bazi kalaj oksida”

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2020

GO

<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	Proučavanje električnog transporta u biomorfnom poluprovodniku na bazi kalaj oksida.
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika kondenzovane materije
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nanomaterijali
<i>ND</i>	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Kalaj oksid, polen, električna provodnost, senzori.
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	Nema
VN	
<i>Izvod:</i>	
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	16.11.2020
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	28.12.2020
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	dr Marko Radović, prof. dr Vesna Bengin, prof. dr Željka Cvejić, prof. dr Maja Stojanović.
KO	
<i>Predsednik:</i>	prof. dr Željka Cvejić

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Sonja Stefanović

AU

Mentor/comentor: Mentor 1: dr Marko Radović,

MN Mentor 2: dr Vesna Bengin.

Title: "Electrical transport in biomorphic semiconductor based on tin oxide"

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2020

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

PD

Study of electrical transport in biomorphic semiconductor based on tin oxide.

Scientific field:

Physics of condensed matter

SF

Scientific discipline:

Nanomaterials

SD

Subject/ Key words:

Tin oxide, pollen, electrical conductivity, sensors.

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

None

N

Accepted by the Scientific Board:

16.11.2020

ASB

Defended on:

28.12.2020

DE

Thesis defend board:

dr Marko Radović,

DB

prof. dr Vesna Bengin,

prof. dr Željka Cvejić,

prof. dr Maja Stojanović.

President:

prof. dr Željka Cvejić

Members:

dr Marko Radović,

prof. dr Vesna Bengin,

prof. dr Maja Stojanović.