

Materijali na bazi barijum titanata kao fotoelektrokatalizatori za reakciju izdvajanje vodonika

SMILJA B. MARKOVIĆ, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd
ORCID: 0000-0002-9264-4406

KATARINA M. ALEKSIĆ, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd
ORCID: 0000-0001-6883-5635

IVANA B. STOJKOVIĆ SIMATOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd
ORCID: 0000-0001-7836-4574

Originalni naučni rad
UDC: 544.526.5:661.96

661.844.017

DOI: 10.5937/tehnika2602113M

Primenom metode reakcije u čvrstom stanju sintetisana je serija barijum-titanatnih materijala tipa $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ (BTS, $x = 0, 0,05$ i $0,10$) u kojima Sn^{4+} delimično zauzima položaj Ti^{4+} . Ispitana je fotoelektrokatalitička aktivnost sintetisanih BTS materijala za reakciju izdvajanja vodonika pri procesu elektrolize vode u kiselom ($0,1 M H_2SO_4$) i alkalnom ($0,1 M NaOH$) elektrolitu. Ispitani su fazni sastav, morfologija i optičke osobine BTS materijala; fotoelektrokatalitička aktivnost je korelisana sa fizičko-hemijskim karakteristikama. Pokazano je da svi sintetisani materijali imaju dobru fotoelektrokatalitičku aktivnost za reakciju izdvajanja vodonika, da aktivnost zavisi od vrste elektrolita i da može da se modifikuje podešavanjem odnosa Ti^{4+}/Sn^{4+} u kristalnoj strukturi $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$.

Ključne reči: barijum titanat, vodonik, fotoelektrokatalizatori

1. UVOD

U XXI veku, uz povećanje broja populacije i konstantni razvoj savremenih tehnologija, beleži se i povećana potrošnja energije uz sve izraženije zagađenje životne sredine. Zbog toga razvoj obnovljivih i čistih izvora energije postaje imperativ [1]. Fosilna goriva, poput nafte, uglja i prirodnog gasa, su i 2026. godine najdominantniji izvor energije. Sagorevanjem fosilnih goriva oslobađa se znatna količina CO_2 , a posledice su prekomerno zagađenje vazduha, oštećenje ozonskog omotača i globalno zagrevanje. Brojna istraživanja usmerena su ka istovremenom rešavanju problema izvora energije i zagađenja životne sredine, i to kroz razvoj tehnologija za iskorišćavanje obnovljivih izvora energije.

Zeleni vodonik, proizveden upotrebom obnovljivih izvora energije, predstavlja perspektivno alternativno gorivo koje može doprineti smanjenju emisije ugljen-dioksida i razvoju održivijih energetskih sistema [2].

Fotoelektrokatalitičko razlaganje vode predstavlja jednu od metoda za proizvodnju vodonika koja se konstantno razvija i usavršava. Kao katalizatori ove reakcije najčešće se koriste poluprovodnički materijali koji apsorbuju sunčevu svetlost i omogućavaju razlaganje vode na vodonik i kiseonik [3]. Kao najefikasniji fotoelektrokatalizatori za proizvodnju zelenog H_2 postupkom elektrolize vode ističu se materijali na bazi platine, ovi materijali nisu u značajnoj meri zastupljeni u prirodi zbog čega je njihova cena velika [4], a to je razlog da se konstantno radi na razvoju novih i ekološki prihvatljivih fotoelektrokatalizatora čija bi cena bila povoljna i omogućila široku primenu. Perovskitni materijali strukture ABO_3 na bazi titanata izdvajaju se kao efikasni fotokatalizatori za odvijanje reakcija izdvajanja vodonika i kiseonika, i to zahvaljujući povoljnom položaju provodne i valentne trake [5]. Ovi materijali su veoma stabilni u vodenoj sredini, što je od velikog značaja za njihovu praktičnu primenu. Pokazano je da se svojstva perovskitnih materijala ABO_3 tipa mogu dodatno poboljšati modifikacijom kristalne strukture, npr. dopiranjem, čime se omogućava fino podešavanje elektronskih i strukturnih karakteristika i povećava fotokatalitička aktivnost [5]. Među oksidima perovskitne strukture, stroncijum-titanat ($SrTiO_3$) i kalcijum-titanat ($CaTiO_3$) spadaju među najviše proučavane fotokatalitičke materijale i pokazali su izu-

Adresa autora: Smilja Marković, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, Kneza Mihaila 35/IV
e-mail: smilja.markovic@itn.sanu.ac.rs
Rad primljen: 27.03.2026.
Rad prihvaćen: 08.04.2026.

zetnu efikasnost u reakcijama razlaganja vode. Za razliku od njih, barijum-titanat (BT, BaTiO_3), uprkos izraženim feroelektričnim, dielektričnim i piezoelektričnim svojstvima, ne pokazuje značajnu fotokatalitičku aktivnost u reakcijama ukupnog razlaganja vode [6]. Među malim brojem publikovanih radova koji se bave fotoelektrokatalitičkim osobinama barijum-titanata ističe se rad autora Ikeda i saradnici [6] u kome je pokazano da se fotoelektrokatalitička aktivnost BT može značajno poboljšati kodopiranjem sa Al^{3+} i Sc^{3+} na poziciji *B* u kristalnoj strukturi ABO_3 odnosno na poziciji Ti^{4+} .

Cilj ovog istraživanja, podstaknut radom Ikeda i saradnika [6], bio je da se sintetiše materijal na bazi barijum-titanata strukture ABO_3 u kome je katjon na poziciji *B* (Ti^{4+}) supstituisan sličnim katjonom iste valence. Pripremljena je serija $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ materijala (BTS, $x=0, 0,05$ i $0,10$) u kojima Sn^{4+} zauzima položaj Ti^{4+} i ispitana je njihova fotoelektrokatalitička aktivnost za reakciju izdvajanja vodonika pri procesu elektrolize vode u kiselom ($0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) i baznom ($0,1 \text{ M NaOH}$) elektrolitu. Osim toga, analizirani su fazni sastav, morfologija i optičke osobine BTS materijala; fotoelektrokatalitička aktivnost je korelisana sa fizičko-hemijskim karakteristikama.

2. EKSPERIMENTALNI RAD

2.1. Sinteza materijala

Kao polazni materijali korišćeni su komercijalni prahovi: barijum-karbonat (BaCO_3 , >99%, Centrohem, Beograd), titanijum-dioksid (TiO_2 , rutil, >99.8%, $2\mu\text{m}$, Ventron, Germany) i kalaj-dioksid (SnO_2 , >99%, Kemika, Zagreb). Smeša prahova BaCO_3 , TiO_2 i SnO_2 je homogenizovana u izopropanolu, mešanjem na magnetnoj mešalici u toku 24 h. Nakon 24 h, suspenzija je procedena, osušena i kalcinisana na 1100°C , 2 h. Kalcinirani prahovi su kompaktni i sinterovani na 1370°C , 2 h, nakon čega su spraseni u avanu. Na ovaj način sintetisani su barijum titanat-stanatni prahovi, stehiometrije $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ (BTS) sa sadržajem kalaja $x=0, 0,05$ i $0,10$; u nastavku teksta, sintetisani BTS prahovi označeni su kao BT, BTS5 i BTS10, redom.

2.2 Karakterizacija materijala

Difraktogrami BTS prahova snimljeni su na uređaju *Philips PW-1050* pomoću $\text{CuK}_{\alpha 1.2}$ zračenja ($\lambda=1,5418 \text{ nm}$), scintilacionog NaJ detektora i Ni filtera. Napon između katode i anode u cevi iznosio je 40 kV , dok je jačina struje bila 20 mA . Difraktogrami su snimani u intervalu uglova 2θ od 10 do 70° , sa korakom $0,05^\circ$ i vremenom trajanja ekspozicije 2 s po koraku. Kristalne faze su identifikovane pomoću *Mach3* softvera za baze podataka, uz referencu na obrasce iz Crystallography Open Database (COD) [7]. Mor-

fologija BTS prahova analizirana je upotrebom skenirajuće elektronske mikroskopije sa emisijom elektrona pod uticajem polja na uređaju SURPA 35 VP Carl Zeiss. Pre snimanja uzorci su dispergovani u etanalu u toku 30 minuta, upotrebom ultrazvučne kade, nakon čega su metodom filtracije nanošeni na polikarbonatne membrane prethodno naparene zlatom. Nakon nanošenja uzoraka na membranu, vršeno je neparavanje ugljenikom radi povećanja provodljivosti. UV-Vis difuzno refleksijski spektri (DRS) snimljeni su na uređaju koji se sastojao od: (1) izvora koji emituje svetlost talasnih dužina od 190 do 2500 nm (izvor čine dve lampe - 30 W deuterijumska i 5 W volframska), (2) CCD fluorescentnog spektrometra i (3) refleksijske sfere prečnika $3,81 \text{ cm}$. Sve komponente su proizvođača Edmund Optics. Spektri BTS prahova i refleksijski beli standard (Spectralon) snimani su u intervalu od 225 do 1000 nm , integraciono vreme snimanja bilo je $100 \mu\text{s}$. Fotoluminiscentni (PL) spektri snimljeni su upotrebom Horiba Jobin Yvon Fluorolog FL3-22 spektrofluorometra sa ksenonskom (Xe) lampom kao izvorom ekscitacije. Emisioni PL spektri su snimani u intervalu talasnih dužina od 350 do 700 nm , sa korakom od 1 nm , pomoću pobuđujućeg zračenja na 280 nm , vreme integracije bilo je $0,2 \text{ s}$.

2.3 Elektrohemijska merenja

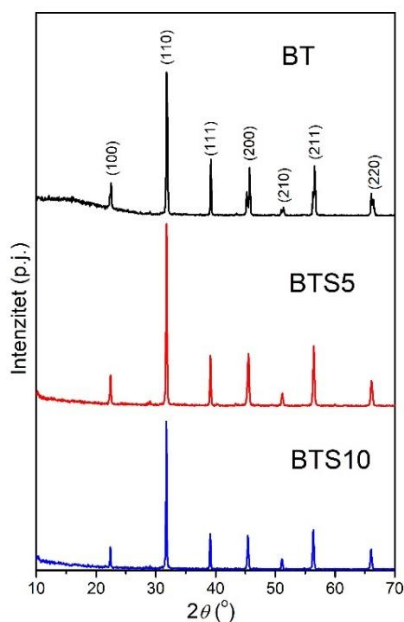
Mastilo koje se nanosi na elektrodu od staklastog ugljenika je pripremano tako što je 5 mg ispitivanog materijala dispergovano u rastvoru koji sadrži $50 \mu\text{l}$ destilovane vode, $50 \mu\text{l}$ etanola i $10 \mu\text{l}$ 5% rastvora nafiona. Pripremljena suspenzija je homogenizovana u ultrazvučnom kupatilu u toku 45 min . Nakon toga, $5 \mu\text{l}$ mastila je naneto na elektrodu od staklastog ugljenika površine $0,3 \text{ cm}^2$. Radi isparavanja rastvarača, elektroda je sušena 45 s infracrvenom lampom (Tungstam INFRASEC 250 W).

Elektrokatalitička (EK, u mraku) i fotoelektrokatalitička (FEK, pri osvetljavanju) aktivnost materijala ispitivana je metodom linearne voltametrije (LV) na potenciostatu/galvanostatu Ivium VertexOne u troelektrodnoj kvarcnoj ćeliji koja se sastoji od elektrode od staklastog ugljenika (pripremljena na gore opisani način) kao radne elektrode, platinske elektrode kao pomoćne elektrode i zasićene kalomelske elektrode (ZKE) kao referentne elektrode. Kao elektroliti su korišćeni $0,1 \text{ M}$ vodeni rastvor sumporne kiseline (H_2SO_4) i $0,1 \text{ M}$ vodeni rastvor natrijum-hidroksida (NaOH). Primenjeni parametri snimanja su: brzina promene potencijala 20 mVs^{-1} i interval potencijala od $0,2$ do $-1,6 \text{ V}$ prema ZKE. Svi potencijali su mereni u odnosu na ZKE i naknadno preračunati na skalu reverzibilne vodonične elektrode (RVE) korišćenjem jednačine 1:

$$E_{RVE}(V) = E_{ZKE} + 0,244 + 0,059 \text{ pH} \quad (1)$$

3. REZULTATI I DISKUSIJA

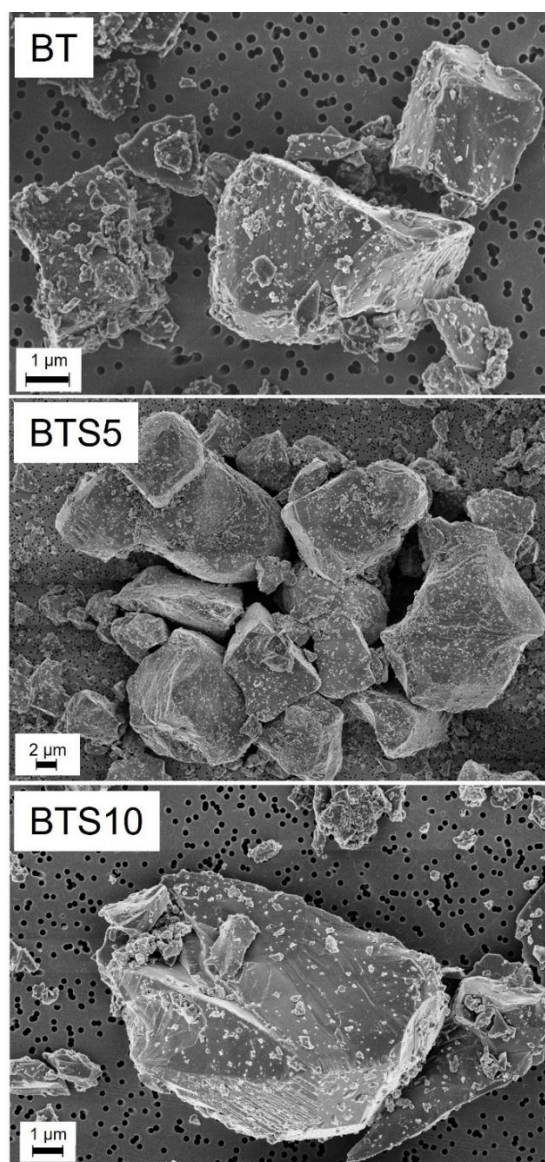
Fazni sastav sintetisanih BTS prahova određen je na osnovu rezultata rendgenske difrakcije na prahu; difraktogrami su prikazani na slici 1. Analizom prikazanih difraktograma utvrđeno je da sve refleksije u uzorcima BT, BTS5 i BTS10 pripadaju tetragonalnoj kristalnoj strukturi barijum titanata (BaTiO_3) i prostornoj grupi $P4mm$, COD 96-150-7757 [7]. Uočeno je da sa povećanjem sadržaja jona kalaja Sn^{4+} u kristalnoj strukturi $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x$ (od BT preko BTS5 do BTS10) dolazi do smanjenja „cepanja“ karakteristične refleksije (200) na 2θ 44-46°, slika 1, što ukazuje na smanjenje tetragonalnosti kristalne strukture. Ranije je pokazano da za sadržaj kalaja $x \geq 0,12$, u kristalnoj strukturi $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ postoji samo jedna refleksija u difraktogramu na položaju 2θ 44-46°, što odgovara kubičnoj kristalnoj simetriji [8]. Uočeno je da se sa povećanjem sadržaja Sn^{4+} položaji refleksija pomeraju ka manjim uglovima 2θ . To se može objasniti supstitucijom manjeg jona Ti^{4+} , čiji je radijus u tetraedarskom okruženju 74,5 pm [8], većim jonom Sn^{4+} - čiji je radijus u tetraedarskom okruženju 83,0 pm [8], usled čega se povećava međuravansko rastojanje d u kristalu, a položaji refleksija pomeraju ka manjim uglovima 2θ . Uske refleksije relativno visokog intenziteta ukazuju na visok stepen kristaliničnosti sva tri sintetisana praha, što je posledica metode sinteze prahova reakcijom u čvrstom stanju na 1370°C.



Slika 1 – Difraktogrami BTS prahova

Da bi se utvrdila morfologija sintetisanih BTS prahova snimljene su FESEM mikrografije prikazane na slici 2. Analizom FESEM mikrografija uočena su zrna nepravilnog oblika i mikrometerskih dimenzija. Oblik i veličina zrna (koja dostiže 10-ak μm) posledica

su reakcije u čvrstom stanju na 1370°C pri čemu je došlo do rasta zrna i njihovog delimičnog sinterovanja [9].



Slika 2 – FESEM mikrografije BTS prahova

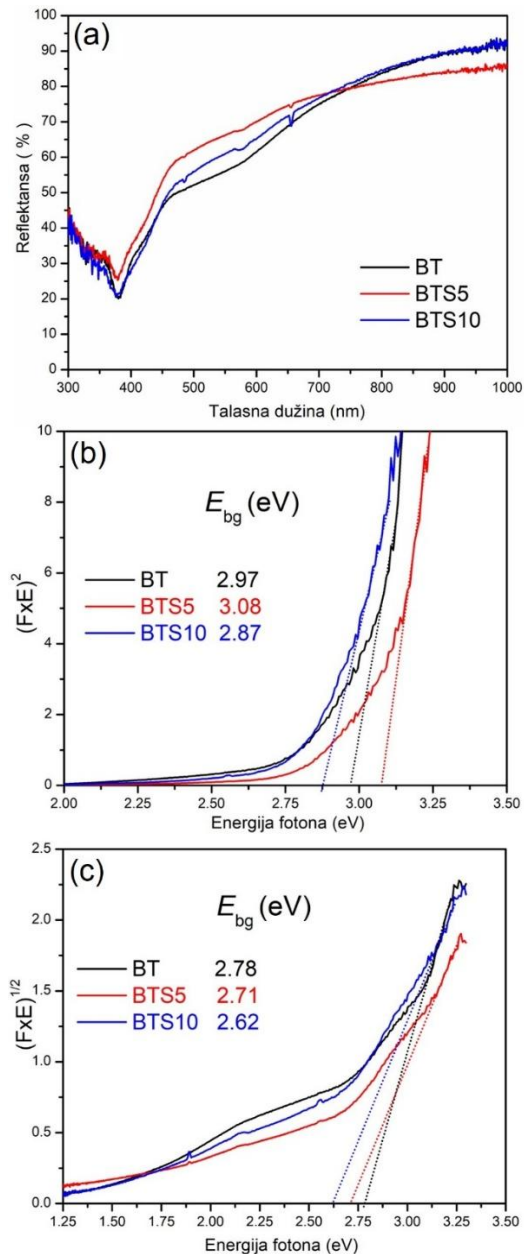
Optičke osobine sintetisanih BTS materijala ispitane su metodama UV-Vis difuzne refleksione spektroskopije (DRS) i fotoluminiscentne (PL) spektroskopije.

Za BTS prahove snimljeni su UV-Vis DRS spektri koji su zatim transformisani pomoću Kubelka-Munkove funkcije da bi se odredile širine energetskih procepa, direktna i indirektna.

Kubelka-Munkova funkcija, $F(R)$, povezana je sa reflektivnošću uzorka, R , izrazom (2) [10]:

$$F(R) = (1 - R)^2 / (2R) \quad (2)$$

gde je R vrednost refleksivnosti izražena kao broj $0 \leq R \leq 1$.



Slika 3 – (a) UV-Vis DRS spektri BTS prahova; Taucovi dijagrami: (b) širina direktnog energetskog procepa i (c) širina indirektnog energetskog procepa

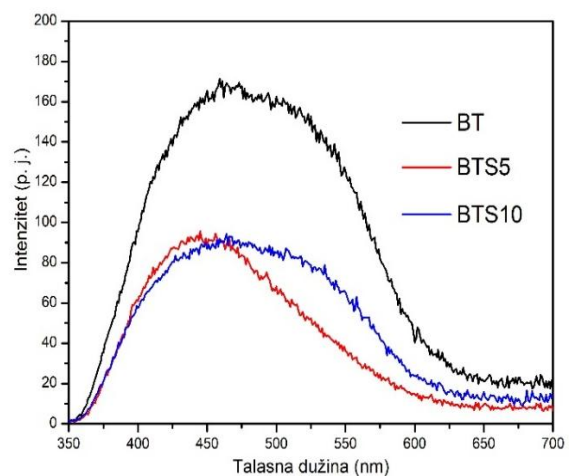
Za određivanje širine direktnog energetskog procepa konstruiše se grafik $(F(R) \times E)^2 = f(E)$ gde je E – energija fotona talasne dužine λ , za koju uzorak pokazuje reflektivnost R . Ekstrapolacijom linearnog dela spektralne linije na vrednost $y = 0$, širina direktnog energetskog procepa E_{bg} se očitava na x osi.

Za određivanje širine indirektnog energetskog procepa konstruiše se grafik $(F(R) \times E)^{1/2} = f(E)$ odakle se vrednost širine indirektnog energetskog procepa određuje ekstrapolacijom, na isti način kao i za direktni.

Na slici 3 (a) prikazani su refleksijski spektri BTS prahova. Može se uočiti da je granica apsorpcije na oko 380 nm, kao i da se apsorpcija u vidljivoj oblasti smanjuje sa povećanjem talasne dužine primenjene svetlosti. Na 550 nm, talasnoj dužini na kojoj sunce emituje najviše svetlosti, reflektansa ispitivanih materijala raste u nizu BT (56%) < BTS10 (61%) < BTS5 (66%). Prema tome, na 550 nm najveći apsorpcioni kapacitet pokazuje BT (44%). Na dugotalasnoj granici vidljive oblasti, reflektivnost sva tri materijala je skoro ista i iznosi oko 80 % na 800 nm.

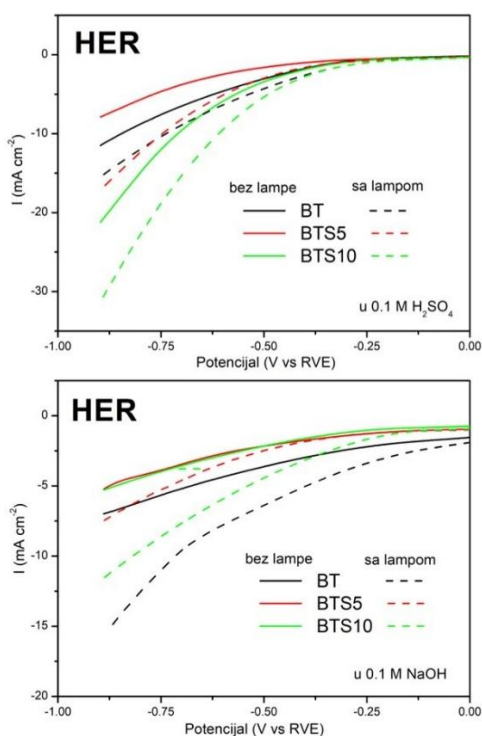
Reflektivnost kristalnih materijala može da se objasni na osnovu defekata u kristalnoj strukturi, čijim elektronskim stanjima odgovaraju takve energije da je moguća ekscitacija apsorpcijom odgovarajućeg kvanta zračenja. Osim defekata u kristalnoj strukturi izuzetno je važna i veličina čestica; tačnije, utvrđeno je da apsorpcioni kapacitet materijala linearno zavisi od dužine optičkog puta svetlosti kroz česticu tj. od njenih dimenzija [11]. Prema tome, može se zaključiti da je najveći apsorpcioni kapacitet uzorka BT, u odnosu na BTS5 i BTS10, usled najveće srednje veličine čestica koja iznosi oko 22 μm [9].

Na slici 3 (b, c) prikazani su Taucovi dijagrami konstruisani na osnovu UV-Vis DRS a nakon primene Kubelka-Munkove funkcije. Određene širine energetskih procepa, izražene u eV, naznačene su na dijagramima. Preračunato u talasnu dužinu, širina direktnog energetskog procepa iznosi 478, 461 i 494 nm za BT, BTS5 i BTS10, redom. Širina indirektnog energetskog procepa iznosi 510, 524 i 542 nm za BT, BTS5 i BTS10, redom. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da promena odnosa sadržaja $\text{Ti}^{4+}/\text{Sn}^{4+}$ u kristalnoj strukturi BTS materijala utiče kako na širinu direktnog energetskog procepa – koji je određen prirodom materijala, tako i na širinu indirektnog energetskog procepa koji je u ovom slučaju izazvan promenom sadržaja defekata u kristalnoj strukturi.



Slika 4 – Fotoluminiscentni spektri BTS prahova

Na slici 4 prikazani su PL spektri BTS materijala. Široke trake u PL spektrima ukazuju na postojanje indirektnog energetskog procepa, formiraju se kada dolazi do emisije sa (pod)nivoa različitih defekata koji se nalaze ispod energetskog nivoa provodne odnosno iznad nivoa valentne zone materijala, pri čemu emitovani fotoni mogu imati različite energije usled čega nastaje spektar koji se sastoji od širokih emisioh traka koje se međusobno preklapaju [10]. Najveći intenzitet PL spektra uzorka BT ukazuje da je u kristalnoj strukturi BaTiO₃ prisutan najveći sadržaj defekata.



Slika 5 – I-E krive za reakciju elektrolitičkog razlaganja vode u 0,1 M H₂SO₄ i 0,1 M NaOH pre i posle 60 min osvetljavanja sistema lampom za BTS fotoelektrokatalizatore

Na slici 5 prikazani su linearni voltamogrami snimljeni za BTS materijale u vodenom rastvoru elektrolita 0,1 M H₂SO₄ u mraku i prilikom osvetljavanja u trajanju od 60 minuta. BTS10 je pokazao najveću katalitičku aktivnost za HER pri gustini struje od 2 mA cm⁻² i u mraku (elektrokataliza) i prilikom osvetljavanja (fotoelektrokataliza). Potencijal na kome ovaj materijal dostiže navedenu gustinu struje je -0,412 i -0,355 V vs. RVE u mraku i prilikom osvetljavanja, redom. BT dostiže navedenu struju na potencijalu -0,420 V i -0,357 vs. RVE, redom, dok BTS5 istu struju dostiže na -0,551 i -0,435 V vs. RVE u mraku i prilikom osvetljavanja, redom. Isti trend je uočen pri poređenju vrednosti gustine struje u mraku na krajnjem intervalu potencijala: -21,2280, -11,6490

i -7,8790 mA cm⁻² za BTS10, BT i BTS5, redom. Prilikom osvetljavanja trend je nešto drugačiji na istom potencijalu: -31,333, -17,142 i -15,498 mA cm⁻² za BTS10, BTS5 i BT, redom.

U slučaju kada je fotoelektrokatalitička aktivnost BTS materijala za reakciju izdvajanja vodonika određivana u alkalnoj sredini, najveću aktivnost pri gustini struje od 2 mA cm⁻² i u mraku i prilikom osvetljavanja je pokazao BT koji navedenu struju dostiže na potencijalu -0,193 i -0,166 V vs. RVE, redom. U mraku je istu struju na nešto nižem potencijalu od -0,463 V vs. RVE pokazao BTS5 dok je BTS10 postigao istu struju na potencijalu većim za 10 mV. Prilikom osvetljavanja uočen je suprotan trend; tačnije, BTS10 je navedenu struju dostigao na potencijalu -0,305 V vs. RVE, a BTS5 na -0,339 V vs. RVE. Ako se uporedi vrednost gustine struje na krajnjem ispitivanom potencijalu u mraku, najveću gustinu struje je postigao BT od -6,984 mA cm⁻² dok je gustina struja za BTS5 i BTS10 bila -5,234 mA cm⁻² i -5,288 mA cm⁻², redom. Na istom potencijalu prilikom osvetljavanja trend je drugačiji: -9,591, -8,435 i -6,232 mA cm⁻² za BTS10, BT i BTS5, redom.

Svi ispitivani materijali su pokazali bolju katalitičku aktivnost prilikom osvetljavanja u oba ispitivana elektrolita.

4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati ispitivanja fizičko-hemijskih osobina i fotoelektrokatalitičke aktivnosti uzoraka BaTi_{1-x}Sn_xO₃ u kojima je sadržaj jona kalaja x = 0, 0,05 i 0,10. Ispitani su fazni sastav (XRD), morfološke (FESEM) i optičke (UV-ViS DRS i PL) osobine prahova BT, BTS5 i BTS10. Testirana je fotoelektrokatalitička aktivnost BTS materijala za reakciju izdvajanja vodonika pri reakciji elektrolize vode u 0,1 M H₂SO₄ i 0,1 M NaOH elektrolitu. Utvrđeno je da BTS materijali pokazuju izuzetnu fotoelektrokatalitičku aktivnost za reakciju izdvajanja vodonika, da fotoelektrokatalitička aktivnost zavisi od vrste elektrolita, tj. da li je kiseli ili alkalni, kao i od stehiometrijskog sastava BaTi_{1-x}Sn_xO₃ materijala. Najbolju fotoelektrokatalitičku aktivnost u 0,1 M H₂SO₄ pokazao je BTS10, dok je u 0,1 M NaOH najaktivniji materijal BT.

5. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, Evidencioni brojevi ugovora: 451-03-33/2026-03/200175 i 451-03-34/2026-03/200146.

LITERATURA

- [1] Huang Y, Liu J, Deng Y, Qian Y, Jia X, Ma M, Yang C, Liu K, Wang Z, Qu S, Wang Z. The application of

- perovskite materials in solar water splitting, *Journal of Semiconductors*, Vol. 41, pp. 011701, 2020.
- [2] Hamdani I, Sagar P, Shahzad F, Gupta V, Das G. Perovskite-based electrocatalysts: A new frontier in water splitting for sustainable hydrogen production, *Nano Energy*, Vol. 149, pp. 111721, 2026.
- [3] Abuova AU, Tolegan UZ, Inerbaev TM, Karibayev M, Satanova BM, Abuova F, Popov AI. A Brief Review of Atomistic Studies on BaTiO₃ as a Photocatalyst for Solar Water Splitting, *Ceramics* Vol. 8, pp. 100, 2025.
- [4] Li S, Hao X, Abudula A, Guan G. Nanostructured Co-based bifunctional electrocatalysts for energy conversion and storage: current status and perspectives, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 7, pp. 18674-18707, 2019.
- [5] Chandrappa S, Myakala SN, Koshi NA, Galbao SJ, Lee S-C, Bhattacharjee S, Eder D, Cherevan A, Murthy DHK. Unveiling Valence State-Dependent Photocatalytic Water Splitting Activity and Photocathodic Behavior in Visible Light-Active Iridium Doped BaTiO₃, *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 16, pp. 8763-8771, 2024.
- [6] Ikeda S, Takagi K, Tomizawa R, Nagano T, Hayashi K, Yamakata A, Nose Y. Activation of barium titanate for photocatalytic overall water splitting via low-valence cation codoping, *Sustainable Energy Fuels*, Vol. 9, No. 24, pp. 6665, 2025.
- [7] Mahmood NB, Al-Shakarchi EK. Three Techniques Used to Produce BaTiO₃ Fine Powder, *Journal of Modern Physics*, Vol. 2, pp. 1420-1428, 2011.
- [8] Marković S, Mitrić M, Cvjetičanin N, Uskoković D. Preparation and properties of BaTi_{1-x}Sn_xO₃ multilayered ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 27, pp. 505-509, 2007.
- [9] Marković S, *Sinteza i karakterizacija BaTi_{1-x}Sn_xO₃ prahova i višeslojnih keramičkih materijala*, Univerzitet u Beogradu – Fakultet za fizičku hemiju, Beograd 2008.
- [10] Marković S, Stojković Simatović I, Ahmetović S, Veselinović Lj, Stojadinović S, Rac V, Škapin SD, Bajuk Bogdanović D, Janković Častvan I, Uskoković D. Surfactant-assisted microwave processing of ZnO particles: A simple way for designing the surface-to-bulk defect ratio and improving photo(electro)catalytic properties, *RSC Advances*, Vol. 9, pp. 17165-17178, 2019.
- [11] Stanković A, Stojanović Z, Veselinović Lj, Škapin SD, Bračko I, Marković S, Uskoković D. ZnO micro and nanocrystals with enhanced visible light absorption, *Materials Science and Engineering B*, Vol. 177, pp. 1038-1045, 2012.

SUMMARY

BARIJUM TITANATE-BASED MATERIALS AS PHOTOELECTROCATALYSTS FOR HYDROGEN EVOLUTION REACTION

Solid state reaction was employed for synthesis of a series of barium titanate-based materials with the stoichiometric formula BaTi_{1-x}Sn_xO₃ (BTS, x = 0, 0.05, and 0.10), where Sn⁴⁺ partially occupies Ti⁴⁺ position. The photoelectrocatalytic activities of the BTS materials were tested for the hydrogen evolution reaction in acidic (0.1 M H₂SO₄) and alkaline (0.1 M NaOH) electrolytes. The phase composition, morphology, and optical properties of the BTS materials were examined. The photoelectrocatalytic activities of BTS materials were correlated with the physico-chemical properties. It was shown that all the BTS materials have good photoelectrocatalytic activities for hydrogen evolution reaction, that the activities depend on the electrolyte type, and that can be modified by adjusting the Ti⁴⁺/Sn⁴⁺ ratio in the BaTi_{1-x}Sn_xO₃ crystal structure.

Key Words: barium titanate, hydrogen, photoelectrocatalysts