

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ – ХЕМИЈСКОГ ФАКУЛТЕТА

ПРЕДМЕТ: Извештај Комисије за оцену докторске дисертације кандидата **Александра С. Малешевића**, мастер хемичара.

На редовној седници Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Хемијског факултета, одржаној 14. децембра 2023. године, изабрани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације (одлука бр. 1004/7) кандидата **Александра С. Малешевића**, мастер хемичара, студента докторских студија Универзитета у Београду – Хемијског факултета и истраживача-сарадника Универзитета у Београду - Института за мултидисциплинарна истраживања, пријављене под насловом:

„Својства високотемпературних протонских проводника на бази баријум-церијум-индијум-оксида”

Веће научних области природних наука Универзитета у Београду је на својој седници одржаној дана 24. децембра 2020. године, на захтев Хемијског факултета, дало сагласност на предлог теме докторске дисертације (одлука бр. 61206-4337/2-20). Комисија је докторску дисертацију прегледала и Наставно-научном већу подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација Александра С. Малешевића написана је на 79 страна А4 формата (фонт *Times New Roman*; величина 12 pt; проред 1,15; маргине 2 cm) и садржи 48 слика и 7 табела. Рад обухвата следећа поглавља: Увод (2 стране), Општи део (31 страна), Циљеви (1 страна), Експериментални део (5 страна), Резултати и дискусија (26 страна), Закључак (2 стране) и Литература (12 страна, 172 цитата). Поред наведеног, дисертација садржи Захвалницу, Сажетак на српском и енглеском језику (по 1 страна), Садржај (2 стране), Листу скраћеница (2 стране), Биографију кандидата (1 страна), Списак објављених и саопштених радова проистеклих из дисертације (1 страна), Изјаву о ауторству (1 страна), Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада (1 страна) и Изјаву о коришћењу (2 стране).

У **УВОДУ** су истакнути значај и потенцијална примена баријум-церијум-оксида допираног индијумом, као високотемпературног протонског проводника. Дефинисан је

предмет докторске дисертације, заснован на могућности примене протонских проводника као електролитног материјала за конструкцију горивних ћелија на бази оксида у чврстом стању и високотемпературних сензора водене паре. У овом делу је дат и кратак опис осталих поглавља ове дисертације.

У **ОПШТЕМ ДЕЛУ** је дат преглед литературе са детаљно описаном структуром и својствима перовскитних оксида и протонских проводника, са посебним освртом на механизам провођења протона код високотемпературних протонских проводника на бази мешовитих оксида перовскитне структуре. Детаљно је описана структура баријум-церијум-оксида и промене до којих долази допирањем алиовалентним катјонима. Истакнути су фактори од којих зависе електричне особине материјала: температура, атмосфера, врста и концентрација допанта, симетрија и запремина јединичне ћелије, као и микроструктура материјала. Описана је структура и принцип рада горивних ћелија на бази оксида у чврстом стању и дат литературни преглед примене допираног баријум-церијум-оксида као електролита. Такође, дат је и преглед примене мешовитих оксида као високотемпературних сензора водене паре.

У **ЦИЉЕВИМА** је дат опис општег научног циља студије, као и неколико специфичних постављених циљева.

У **ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОМ ДЕЛУ** је описана синтеза прекурсорских прахова опште формуле $\text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$, као и процесирање добијених прахова и оптимизација процеса синтеровања. У овом делу дисертације, детаљно су описане технике и методе које су коришћене за карактеризацију керамичких прахова и синтерованог материјала. Поред тога је описана израда и карактеризација горивне ћелије, као и апаратура за испитивање сензорских својстава добијеног материјала.

У делу **РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА** су представљени резултати анализе структурних, микроструктурних и електричних својстава добијених прахова и синтерованих материјала, и испитана је њихова хемијска стабилност. Приказани су резултати испитивања функционалности и структуре горивне ћелије израђене користећи добијени материјал као електролит. Такође, дати су и резултати одређивања сензорских својстава материјала као високотемпературног сензора водене паре.

У делу **ЗАКЉУЧЦИ** представљени су најважнији резултати остварени током израде ове докторске дисертације.

У делу **ЛИТЕРАТУРА** наведено је укупно 172 референце на основу редоследа појављивања у тексту.

Б. Кратак опис постигнутих резултата

У овој докторској дисертацији је приказана синтеза осам прекурсорских прахова методом самосагоревања опште формуле $\text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35$ и $0,40$), са ознакама: BCI5, BCI10, BCI15, BCI20, BCI25, BCI30, BCI35 и BCI40. Ова метода је одабрана као једноставан, ефикасан и економичан начин за добијање прахова оксидних материјала високе чистоће, хомогености и велике специфичне површине. Као почетни реагенси у синтези су коришћене одговарајуће нитратне соли метала, јер нитратни јон игра улогу оксидационог средства у процесу самосагоревања. Коришћена је и лимунска киселина која, поред тога што са јонима метала гради координациона једињења, у процесу самосагоревања служи као гориво.

Прекурсорски прахови су калцинисани на $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ и структура и фазни састав калцинисаних прахова су утврђени рендгенском дифракционом анализом. Дифракциони максимуми свих узорака су приписани перовскитној структури са орторомбичном симетријом, просторне групе $Pnma$. Са порастом концентрације индијума долази до смањења запремине јединичне ћелије, што је очекивано јер је јонски радијус индијума мањи од јонског радијуса церијума. Такође, код узорака са концентрацијом индијума изнад 25 % (мол.) јављају се дифракциони максимуми који потичу од секундарне фазе индијум-оксида.

Понашање материјала на високим температурама испитано је дилатометријском анализом, при чему је утврђено да на температури од $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ долази до наглог смањења димензија узорака, односно одвијања процеса синтеровања. Утицај температуре синтеровања је даље испитан термичким третманом узорака добијених униаксијалним пресовањем прахова под притиском од 150 MPa на различитим температурама ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Густине изнад 90 % теоријске густине за све узорке су постигнуте тек на температури од $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Код узорака синтерованих на истој температури приметан је пораст густине са порастом концентрације индијума од 5 до 25 % (мол.), а затим благи пад изнад те концентрације. Узорак BCI25 је постигао највећу густину у поређењу са осталим узорцима на свим температурама, и његова густина износи 98 % од теоријске вредности за узорак синтерован на $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Микроструктура узорака BCI5, BCI25 и BCI40 синтерованих на $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ је испитана сканирајућом електронском микроскопијом. Уочено је да величина зрна има мултимодалну дистрибуцију код свих узорака. Повећање концентрације допанта од 5 % (мол.) до 25 % (мол.), као и повећање температуре синтеровања доводи до повећања средње вредности величине зрна, које за узорке синтероване на $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ износе $0,8\text{ }\mu\text{m}$ за BCI5 и $1,4\text{ }\mu\text{m}$ за BCI25 и BCI40.

Електрична својства $\text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$ су испитана електрохемијском импедансном спектроскопијом на $\text{Pt} \parallel \text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta} \parallel \text{Pt}$ ћелијама у атмосфери влажног водоника у температурном опсегу од $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Укупна проводност узорака синтерованих на $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ већа је од узорака истог састава синтерованих на нижим температурама што се може објаснити разликама у микроструктури и већим релативним густинама као последица више температуре синтеровања. Када се пореде проводљивости узорака различитог састава синтерованих на једној температури, највећа вредност

проводљивости од $0,0052 \text{ S cm}^{-1}$ је добијена на 700°C за узорак BCI25 синтерован на 1300°C .

Утицај индијума на хемијску стабилност BaCeO_3 испитан је излагањем узорака BCI15, BCI20 и BCI25, синтерованих на 1300°C , атмосфери чистог CO_2 на 700°C током 6 h. Поређењем дифрактограма пре и после излагања атмосфери CO_2 , код узорака BCI15 и BCI20 се уочавају мали дифракциони максимуми на око $2\theta = 24^\circ$, који указују на присуство трагова BaCO_3 фазе. Код узорка BCI25 није детектовано присуство карбонатне фазе.

На основу резултата карактеризације синтерованих узорака, BCI25 је због оптималних својстава одабран као материјал за израду компоненти (електролит и електроде) горивне ћелије на бази оксида у чврстом стању. У циљу добијања што тањег електролита одабрана је конфигурација ћелије са носећом анодом, која је добијена поступком копресовања/косинтеровања електролита и аноде. Анодна страна горивне ћелије $\text{Ni-BCI25} \parallel \text{BCI25} \parallel \text{LSCF-BCI25}$ је изложена атмосфери влажног водоника, док је катодна страна изложена ваздуху. Измерене вредности напона ћелије (ΔE) у режиму отвореног кола, од 1,05 V на 550°C до 0,98 V на 700°C , блиске су теоријским вредностима добијеним помоћу Нернстове једначине. Овако високе вредности измереног напона указују на то да су компоненте горивне ћелије добрих микроструктурних карактеристика: електролит је без пора и пукотина које би довеле до продора водоника кроз ћелију, а електроде довољно порозне за несметано одвијање електродних полуреакција. Максимална густина излазне снаге се повећавала са повећањем температуре од 126 mW cm^{-2} на 550°C до 264 mW cm^{-2} на 700°C .

У циљу испитивања могућности примене BCI25 као високотемпературног сензора водене паре извршена је електрична карактеризација синтерованог узорка у температурном опсегу од 250°C до 700°C у атмосфери сувог и влажног аргона. Разлика у импеданси узорка у различитим атмосферама постоји у целом температурном опсегу, са тим да се изнад 450°C постепено смањује. Због споре дифузије гаса кроз густо синтеровани материјал, испитивања сензорских својстава су вршена на порозном филму добијеном од истог материјала термичким третманом на 1050°C у току 5 h. Сканирајућом електронском микроскопијом је утврђено да се филм дебљине $\sim 30 \text{ }\mu\text{m}$ састоји од честица величине приближно 100 nm и агломерата од неколико микрометара, односно да је задржао специфичну површину праха од ког је формиран.

Импеданса порозног филма је мерена уз наизменичан проток сувог и влажног аргона у температурном опсегу од 450°C до 600°C . Као оптимална за испитивање сензорских својстава порозног филма је одабрана температура од 500°C , јер се са повећањем температуре промена импедансе, тј. осетљивост сензора смањује, док импеданса на нижим температурама достиже високе вредности које нису практично мерљиве. Поред велике разлике у проводљивости, осетљивост порозног филма у температурном опсегу од 450°C до 600°C се није значајно разликовала од осетљивости таблете синтероване на 1400°C . Увођењем водене паре у атмосферу сувог аргона долази до брзог пада импедансе (време одзива од неколико секунди), док опоравак сензора приликом увођења сувог аргона траје неколико минута. Тестом поновне употребе показано је да хистерезис у сувом и влажном аргону износи по 3 %

смањења осетљивости, односно 0,6 % између прва два пара циклуса, док између наредних циклуса није уочена даља промена. Смањењем парцијалног притиска водене паре смањивала се и осетљивост ($|Z|_{\text{суvAr}}/|Z|_{\text{vlažanAr}}$), редом од 3,92 (на 2,34 kPa), 3,53 (на 1,17 kPa), 2,43 (на 0,468 kPa) до 1,88 (на 0,234 kPa), док се време одзива повећало од 1,0 min, 2,5 min, 4,2 min и 4,7 min, а време опоравка смањивало: 11,0 min, 10,5 min, 6,8 min и 6,0 min.

В. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе

Протонска проводљивост керамичких материјала на бази допираног баријум-церијум-оксида на високим температурама је предмет истраживања још од осамдесетих година прошлог века [1]. Могућност провођења протона и одсуство електронске проводљивости, као и њихова термичка стабилност, чини ове материјале погодним за примену као електролитног материјала у горивним ћелијама на бази оксида у чврстом стању. Развој горивних ћелија као извора енергије је значајан јер се одликују директним претварањем хемијске енергије у електричну, са споредним производима који не представљају опасност по животну средину, што их чини еколошки прихватљивијом алтернативом. Керамички материјали могу имати сензорска својства и као такви се могу користити у конструкцији гасних сензора, укључујући и сензоре осетљиве на присуство водене паре, што може имати велики значај у индустријским процесима. Међутим, детекцији водене паре на високим температурама је до сада посвећен мали број истраживања [2-4].

Као високотемпературни протонски проводник, у литератури је највише испитиван баријум-церијум-итријум-оксид. Побољшање његових својстава је покушано заменом итријума елементима ретких земаља [5], као и кодопирањем елементима веће електронегативности [6,7]. Стога се индијум, као тровалентни јон амфотерног карактера, намеће као прикладан избор за допирање баријум-церијум-оксида јер, осим што служи као извор дефеката кристалне структуре, инхибира његову деградацију у присуству угљеник(IV)-оксида, побољшава синтерабилност и снижава температуру синтеровања. Иако се у литератури могу наћи радови у којима је индијум коришћен за допирање баријум-церијум-оксида [8,9], у овој дисертацији је извршено допирање у широком опсегу концентрација, што омогућује детаљнији увид у утицај концентрације индијума на својства баријум-церијум-оксида.

У току израде ове докторске дисертације, кандидат је синтетисао прахове састава $\text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35$ и $0,40$) и процесирао их у синтероване узорке. Показано је да допирање индијумом доводи до побољшања синтерабилности јер су керамички материјали високе релативне густине (98 %) добијени синтеровањем на температури од 1300 °C, што је знатно нижа температура од литературних за материјале сличног састава, која је обично изнад 1400 °C [6,10]. Повећање концентрације индијума до 25 % (мол.) доводи до пораста зрна, што је и очекивано с обзиром на то да индијум побољшава синтерабилност, док даље повећање концентрације допанта не утиче на микроструктуру. Проводљивост узорака је расла

повећањем температуре синтеровања, као и садржаја индијума, и dostigla maksimalnu vrednost za uzorak BCI25. Благі пад укупне проводљивості код узорака са концентраціјом индијума већом од 25 % (мол.) се може објаснити присуством секундарне фазе, мањом релативном густином, смањењем јединичне ћелије и променом у симетрији јединичне ћелије. Највише вредности специфичне проводљивості су добијене за BCI25 на температури од 700 °C и износе 0,0042 S cm⁻¹ и 0,0052 S cm⁻¹ за узорке синтероване на 1200 °C и 1300 °C, редом, што је нешто ниже од литературних вредности које често достижу 10⁻² S cm⁻¹ [7,10]. Такође, показало се да индијум побољшава хемијску стабилност BaCeO₃ у атмосфери која садржи CO₂ повећавајући киселост кристалне решетке. Због своје проводљивості и хемијске стабилності BCI25 је одабран за конструкцију горивне ћелије Ni-BCI25||BCI25||LSCF-BCI25, синтероване на 1300 °C, која постиже максималну излазну снагу од 264 mW cm⁻² на 700 °C, што је упоредиво са оптималним резултатима у литератури [9].

Услед највеће вредности за протонску проводљивост, очекивало се да ће BCI25 показати добру осетљивост на присуство влаге, што може омогућити његову примену као сензора водене паре. Температура од 500 °C је одабрана као оптимална за испитивање сензорских својстава BCI25 у форми филма у условима различитих концентрација водене паре. Времена одзива и опоравка за порозни филм су била 1 min и 11 min, редом, слично литературним вредностима за Ba₃Ca_{1,18}Nb_{1,82}O₉ [2], док је код BaZrO₃ допираног итријумом време опоравка било краће [3,4]. Осетљивост филма се смањивала са смањењем парцијалног притиска водене паре, док је значајна осетљивост забележена чак и на 230 Pa. Релативно смањење осетљивості, изражено појавом хистерезиса импедансе у сувом аргону, је било око 3 %, док је у атмосфери засићеног влажног аргона износило 0,6 % између прва два циклуса. Ове вредности су сличне и мало ниже од оних у литератури [3,4].

Литература:

- [1] H. Iwahara, H. Uchida, K. Ono, K. Ogaki, Proton conduction in sintered oxides based on BaCeO₃, J. Electrochem. Soc. 135 (1988) 529–533. <https://doi.org/10.1149/1.2095649>.
- [2] W. Wang, A.V. Virkar, A conductimetric humidity sensor based on proton conducting perovskite oxides, Sensors Actuators B Chem. 98 (2004) 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.10.035>.
- [3] X. Chen, L. Rieth, M.S. Miller, F. Solzbacher, High temperature humidity sensors based on sputtered Y-doped BaZrO₃ thin films, Sensors Actuators B Chem. 137 (2009) 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.01.024>.
- [4] X. Chen, L. Rieth, M.S. Miller, F. Solzbacher, Pulsed laser deposited Y-doped BaZrO₃ thin films for high temperature humidity sensors, Sensors Actuators B Chem. 142 (2009) 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.07.041>.
- [5] S. Wang, J. Shen, Z. Zhu, Z. Wang, Y. Cao, X. Guan, Y. Wang, Z. Wei, M. Chen, Further optimization of barium cerate properties via co-doping strategy for potential

- application as proton-conducting solid oxide fuel cell electrolyte, J. Power Sources. 387 (2018) 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.03.054>.
- [6] A. Radojković, M. Žunić, S.M. Savić, G. Branković, Z. Branković, Chemical stability and electrical properties of Nb doped $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ as a high temperature proton conducting electrolyte for IT-SOFC, Ceram. Int. 39 (2013) 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.06.026>.
- [7] A. Radojković, M. Žunić, S.M. Savić, S. Perać, D. Luković Golić, Z. Branković, G. Branković, Co-doping as a strategy for tailoring the electrolyte properties of $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$, Ceram. Int. 45 (2019) 8279–8285. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.134>.
- [8] L. Bi, Z. Tao, C. Liu, W. Sun, H. Wang, W. Liu, Fabrication and characterization of easily sintered and stable anode-supported proton-conducting membranes, J. Memb. Sci. 336 (2009) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.03.042>.
- [9] L. Bi, S. Zhang, L. Zhang, Z. Tao, H. Wang, W. Liu, Indium as an ideal functional dopant for a proton-conducting solid oxide fuel cell, Int. J. Hydrogen Energy. 34 (2009) 2421–2425. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.087>.
- [10] A. Radojković, M. Žunić, S.M. Savić, G. Branković, Z. Branković, Enhanced stability in CO_2 of Ta doped $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ electrolyte for intermediate temperature SOFCs, Ceram. Int. 39 (2013) 2631–2637. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.09.028>.

Г. Објављени и саопштени радови који чине део дисертације

Из резултата ове докторске дисертације проистекла су два рада у међународним научним часописима са SCI листе (један рад категорије M21a и један рад категорије M21), као и два саопштења са међународних скупова штампана у изводу (категорије M34).

Објављени и саопштени радови који су део дисертације:

M21a – Рад објављен у међународном часопису изузетних вредности

1. **Aleksandar Malešević**, Aleksandar Radojković, Milan Žunić, Aleksandra Dapčević, Sanja Perać, Zorica Branković, Goran Branković, Evaluation of stability and functionality of $\text{BaCe}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$ electrolyte in a wider range of indium concentration, Journal of Advanced Ceramics, 11(3) (2022) 443–453, IF₂₀₂₂ = 16,9 (M21a, Наука о материјалима, керамика 1/28). <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0547-1>.

M21 – Рад објављен у врхунском међународном часопису

1. **Aleksandar Malešević**, Aleksandar Radojković, Milan Žunić, Slavica M. Savić, Sanja Perać, Zorica Branković, Goran Branković, Electrical and sensing properties of indium-doped barium cerate, Ceramics International, 49 (2023) 15673–15679,

IF₂₀₂₂ = 5,2 (M21, Наука о материјалима, керамика 3/28).
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.159>.

M34 – Саопштења са међународних скупова штампана у изводу

1. **Aleksandar Malešević**, Aleksandar Radojković, Milan Žunić, Aleksandra Dapčević, Sanja Perać, Zorica Branković, Goran Branković, Stability and functionality of BaCe_{1-x}In_xO_{3-δ} as a high temperature proton conducting electrolyte for solid oxide fuel cells, 6th Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials, 6CSCS-2022, 28–29. јун 2022, стр. 57, Београд, Србија, ISBN: 987-86-80109-23-7.
2. **Aleksandar Malešević**, Aleksandar Radojković, Milan Žunić, Slavica M. Savić, Sanja Perać, Zorica Branković, Goran Branković, High-temperature humidity sensing ability of indium-doped barium cerate, 7th Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials, 7CSCS-2023, 14–16. јун 2022, стр. 76–77, Београд, Србија, ISBN: 978-86-80109-24-4.

Поред наведених публикација и саопштења који су проистекли из ове дисертације, кандидат је коаутор на још три научна рада из категорије M21, један научни рад из категорије M22, осам саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34) и пет саопштења са скупова од националног значаја штампаних у изводу (M64).

Д. Провера оригиналности докторске дисертације

Оригиналност докторске дисертације под називом „Својства високотемпературних протонских проводника на бази баријум-церијум-индијум-оксида”, аутора Александра С. Малешевића, проверена је 11. 12. 2023. на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22.06.2018). Помоћу програма *iThenticate* утврђено је да количина подударања текста износи укупно 12 %. Овај степен подударности последица је библиографских података о коришћеној литератури, општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове докторске дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, Комисија сматра да је докторска дисертација Александра С. Малешевића оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

Б. Закључак

На основу приказаних резултата, Комисија је закључила да је у поднетој докторској дисертацији под називом **„Својства високотемпературних протонских проводника на бази баријум-церијум-индијум-оксида”** кандидат Александар С. Малешевић, мастер хемичар, успешно одговорио на задате циљеве у оквиру којих је испитиван утицај концентрације индијума, као допанта, на структурна, микроструктурна и електрична својства баријум-церијум-оксида. Кандидат је оптимизовао услове синтеровања у циљу добијања непорозне керамике високе релативне густине и испитао утицај температуре синтеровања и садржаја индијума на микроструктуру добијених керамичких материјала. Показано је да повећање температуре синтеровања доводи до пораста зрна код узорака истог састава. Такође, повећање концентрације индијума до 25 % (мол.) резултује порастом величине зрна, док изнад те концентрације нема даљег утицаја. Испитан је утицај садржаја индијума на хемијску стабилност материјала у атмосфери која садржи CO_2 , где се показало да 25 % (мол.) у потпуности спречава настанак карбонатне фазе. Синтеровани материјали су окарактерисани електрохемијском импедансном спектроскопијом, чиме је показано да укупна електрична проводност расте са порастом концентрације индијума до 25 % (мол.), а изнад те концентрације благо опада. На основу ових резултата кандидат је одабрао узорак састава $\text{BaCe}_{0,75}\text{In}_{0,25}\text{O}_{3-\delta}$ (BCI25) због оптималних својстава као материјал за израду компоненти (електролит и електроде) горивне ћелије на бази оксида у чврстом стању. Горивна ћелија састава $\text{Ni-BCI25} \parallel \text{BCI25} \parallel \text{LSCF-BCI25}$ са носећом анодом је успешно израђена методом копресовања/косинтеровања, што је показано релативно високим вредностима напона отвореног кола (1,05 V на 550 °C до 0,98 V на 700 °C) и максималне густине излазне снаге (од 126 mW cm⁻² на 550 °C до 264 mW cm⁻² на 700 °C). BCI25 се показао и као погодан материјал за израду високотемпературних сензора водене паре. Добијени сензор је, у форми порозног филма, веома осетљив чак и на ниским парцијалним притисцима водене паре (до 0,234 kPa) са оптималним режимом рада на 500 °C. Такође, тестом поновне употребе је показано да се сензор може више пута употребљавати уз хистерезис импедансе у сувом аргону око 3 %, а у атмосфери засићеног влажног аргона 0,6 % између прва два циклуса.

Резултати истраживања проистекли из ове докторске дисертације до сада су објављени у два научна рада, и то: један у међународном часопису изузетних вредности (M21a), један у врхунском међународном часопису (M21) на којима је кандидат први аутор, као и у два саопштења са скупова међународног значаја штампана у изводу (M34).

Комисија сматра да постигнути резултати у приложеној докторској дисертацији представљају значајан допринос у области опште и неорганске хемије, тј. науке о материјалима. На основу свега наведеног, а у складу са Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду – Хемијског факултета, Комисија сматра да су испуњени сви услови за одбрану докторске дисертације и са задовољством предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Хемијског факултета да поднету

докторску дисертацију **Александра С. Малешевића**, под насловом „**Својства високотемпературних протонских проводника на бази баријум-церијум-индијум-оксида**”, прихвати и одобри њену одбрану у циљу стицања академског звања доктора хемијских наука.

У Београду, **??.12.2023.**

Комисија

др Тамара Тодоровић, редовни професор (ментор)
Универзитет у Београду – Хемијски факултет

др Александар Радојковић, виши научни сарадник (ментор)
Универзитет у Београду – Институт за мултидисциплинарна истраживања

др Божидар Чобелић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Хемијски факултет

др Милан Жунић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за мултидисциплинарна истраживања

др Сања Пераћ, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за мултидисциплинарна истраживања