

## НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

Број

0801-1750/1

Датум

21. 11. 2023

### Извештај комисије за избор др Бојана Стојадиновића у звање виши научни сарадник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 07.11.2023. године именовани смо у комисију за избор др Бојана Стојадиновића у звање виши научни сарадник.

Прегледом материјала који нам је достављен, као и на основу личног познавања кандидата и увида у његов рад и публикације, Научном већу Института за Физику у Београду подносимо овај извештај.

### 1. БИОГРАФСКИ И СТРУЧНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Др Бојан Стојадиновић је рођен у Пожаревцу 23. маја 1988. године. Завршио је Пожаревачку гимназију, са одличним успехом. Основне студије је уписао 2007. године на Физичком факултету, Универзитета у Београду, на смеру Примењена физика и информатика. Основне студије је завршио јуна 2011. године са просеком 9.3. Мастер студије је уписао на Физичком факултету, Универзитета у Београду, смер Теоријска и експериментална физика и завршио јуна 2012. године са просеком 10, где је мастер рад са темом „Испитивање електронске структуре нанокристала церијум диоксида скенирајућом тунелском микроскопијом“ урадио у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику у Београду. Исте године уписује докторске студије, ужа научна област: Физика кондензоване материје и статистичка физика. Докторску дисертацију под називом „Утицај 4f допаната на мултифероичне особине  $\text{BiFeO}_3$  наноматеријала“, урађену под руководством др Зоране Дохчевић-Митровић, одбранио је 28.09.2018. на Физичком факултету у Београду. Др Бојан Стојадиновић је започео истраживачки рад на Институту за физику у Београду септембра 2011. године, а запослен је од 01.04.2013. године у Центру за физику чврстог стања и нове материјале. Од 2016. године је ангажован у оквиру Лабораторије за наноструктуре Института за физику у Београду на пројекту ОИ171032 чији је руководиоца др Зорана Дохчевић-Митровић. У звање истраживач сарадник изабран је децембра 2014. године, а у звање научни сарадник јуна 2019. године.

Др Бојан Стојадиновић је током 2016. године био учесник школе у Бечу под називом „Training School and 6<sup>th</sup> Workshop on FEBIP (Focused Electron Beam Induced Processing) 2016“ у оквиру COST акције CELINA (Chemistry for Electron-Induced Nanofabrication), а имао је и једну посету Универзитету Гете у Франкфурту у оквиру билатералне сарадње са Немачка којом је руководио др Братислав Маринковић. Почетком 2017. године је био на краћем боравку на STSM (Short-term scientific missions) пројекту, у оквиру COST акције CELINA, под називом „Ferroelectric properties of  $\text{BiFeO}_3$  thin films as monitored by nano-granular sensor structures prepared by focused electron beam induced deposition“, у истој групи на Гете Универзитету у Франкфурту. Новембра 2019. године је похађао тренинг курс импедансне спектроскопије „Introduction to Applied Impedance



*Spectroscopy*“ у Дармштату. Др Бојан Стојадиновић до сада има 23 објављене научне публикације. Према бази *Scopus*, ови радови су цитирани више од 400 пута, уз Хиршов индекс 11. Др Бојан Стојадиновић је добитник награде Привредне коморе Србије за најбољу докторску дисертацију у 2017/18. години.

## 2. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ АКТИВНОСТИ

Досадашњи научноистраживачки рад др Бојана Стојадиновића припада области физике чврстог стања, и усмерен је на синтезу и проучавање вибрационих, магнетних и електричних особина мултифероичних, метал-оксидних, феритних и титанатних наноматеријала. Кандидат се после избора у претходно звање бавио проучавањем механизма спин-фонон интеракције, транспортних својстава, оптичких и електронских особина мултифероичних, метал-оксидних и  $\text{NaNbO}_3$  наноматеријала. У наставку су укратко описане главне активности др Бојана Стојадиновића у оквиру истраживачких тема.

*Напомена: Радови публиковани у периоду након претходног избора у звање су подвучени.*

### 2.1. Мапирање морфологије нанопрахова $\text{CeO}_2$ и $\text{La}$ допираних $\text{TiO}_2$ скенирајућим микроскопским техникама

У првом делу истраживања проучавани су утицаји допирања и метода синтезе на структуру, фотокаталитичка, електрична, оптичка, морфолошка и магнетна својства  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CeO}_{2-y}$  нанопрахова рендгенском дифракцијом, Рамановом спектроскопијом, спектроскопском елипсометријом, електронском микроскопијом и магнетним мерењима. Кандидат се у овим истраживањима бавио мапирањем морфологије зрна скенирајућим микроскопским техникама и одређивао вредности енергијских процепа ових материјала из I-V мерења коришћењем модела диференцијалне проводности. Описани резултати објављени су у једном раду у међународном часопису изузетних вредности и два рада у врхунским међународним часописима:

- M. Radović, B. Stojadinović, N. Tomić, A. Golubović, B. Matović, I. Veljković, Z. Dohčević-Mitrović, “Investigation of surface defect states in  $\text{CeO}_{2-y}$  nanocrystals by Scanning–tunneling microscopy/spectroscopy and ellipsometry”, *J. Appl. Phys.* 116 (2014) 234305 (M21).
- M. Grujić-Brojčin, S. Armaković, N. Tomić, B. Abramović, A. Golubović, B. Stojadinović, A. Kremenović, B. Babić, Z. Dohčević-Mitrović, M. Šćepanović, “Surface modification of sol-gel synthesized  $\text{TiO}_2$  nanoparticles induced by La-doping”, *Mater. Charact.* 88 (2014) 30-41 (M21a).
- A. Golubović, N. Tomić, N. Finčur, B. Abramović, I. Veljković, J. Zdravković, M. Grujić-Brojčin, B. Babić, B. Stojadinović, M. Šćepanović, “Synthesis of pure and La-doped anatase nanopowders by sol-gel and hydrothermal methods and their efficiency in photocatalytic degradation of alprazolam”, *Ceram. Int.* 40 (2014) 13409-13418 (M21).



## 2.2. Испитивање вибрационих, структурних, диелектричних, фeroелектричних и магнетних особина $\text{BiFeO}_3$ материјала

Мултифероични материјали су материјали који истовремено испољавају (анти)-феромагнетно, (анти-)фероелектрично и фeroеластично уређење и могу имати потенцијалну примену у областима спинтронике, магнето-електричних сензора, фeroелектричних меморија, итд. Кандидат се претежно бавио испитивањем мултифероичних  $\text{BiFeO}_3$  материјала методама Раман спектроскопије, спектроскопске елипсометрије, скенирајуће микроскопије, као и анализом резултата рендгенске дифракције, диелектричних и магнетних мерења.

Испитиване су диелектричне и фeroелектричне особине (на собној температури)  $\text{BiFeO}_3$  керамика допираних Pr и Ce јонима ( $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}(\text{Ce})_x\text{FeO}_3$ ,  $0 \leq x \leq 0.1$ ) које су синтетисане методом самосагоревања. Рендгенском дифракцијом је утврђено да је, у случају највеће концентрације допаната (у  $\text{Bi}_{0.90}\text{Pr}_{0.10}\text{FeO}_3$  и  $\text{Bi}_{0.90}\text{Ce}_{0.10}\text{FeO}_3$  узорцима), дошло до делимичне структурне фазне трансформације из ромбодарске у орторомбичну ( $\text{Bi}_{0.90}\text{Pr}_{0.10}\text{FeO}_3$  узорак) и псеудотетрагоналну ( $\text{Bi}_{0.90}\text{Ce}_{0.10}\text{FeO}_3$  узорак) фазу, што је довело до промена у фeroелектричним и диелектричним својствима ових материјала. Диелектрична и фeroелектрична својства  $\text{BiFeO}_3$  керамике су побољшана Pr допирањем због смањења концентрације кисеоничних ваканција и утицаја поларизације просторног наелектрисања. Што се тиче Ce допираних керамика, показано је да 3 mol% допирања церијумом доводи до побољшања диелектричних и фeroелектричних особина, док повећана концентрација Ce јона доводи до деградације диелектричних и фeroелектричних особина услед појаве параелектричне псеудотетрагоналне фазе и присуства проводне секундарне  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  фазе. Описани резултати објављени су у једном раду у међународном часопису изузетних вредности:

- **B. Stojadinović, Z. Dohčević-Mitrović, N. Paunović, N. Pić, N. Tasić, I. Petronijević, D. Popović, B. Stojanović**, "Comparative study of structural and electrical properties of Pr and Ce doped  $\text{BiFeO}_3$  ceramics synthesized by auto-combustion method", *J. Alloy. Compd.* 657 (2016) 866-872 (M21a).

Испитивани су  $\text{BiFeO}_3$  прахови и керамике добијене коришћењем методе самосагоревања и сол-гел методом. Циљ истраживања је био да се испита утицај различитих горива, комплексних агенаса и термичке обраде на структуру, чистоћу прахова, густину  $\text{BiFeO}_3$  керамике, вибрационе, магнетне и електричне особине. Коришћена је техника рендгенске дифракције како би се утврдиле оптималне температуре и времена калцинације и синтеровања. Скенирајућа електронска микроскопија је показала да узорци који су синтетисани сол-гел методом формирају мање агломерате и мања зрна са мање секундарних фаза. Вибрационе и структурне особине прахова и  $\text{BiFeO}_3$  керамика су испитиване инфрацрвеном, Рамановом спектроскопијом и рендгенском фотоелектронском спектроскопијом из којих су се добиле информације о структури и присуству дефеката и секундарних фаза. Након детаљне анализе структурних и вибрационих особина издвојени су узорци добијени коришћењем урее као горива у самосагоревајућој методи и винске киселине као горива у сол-гел методи, јер су показали најчистију ромбодарску  $R3c$  фазу. Проучаване су



електричне и магнетне особине ових узорка. Закључено је да отпорност углавном потиче од границе зрна и да оба посматрана узорка имају мању отпорност од монокристалног узорка. Показано је да ови узорци имају доминантно антиферомагнетно уређење, без присуства феромагнетне компоненте. Кандидат је методом Раманове спектроскопије пратио утицај одређеног горива и температуре на структурне и вибрационе особине  $\text{BiFeO}_3$  прахова и керамика. Мерењем Раманових спектра детектовано је присуство/одсуство секундарних фаза ( $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  и  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ ) у зависности од коришћеног горива и од примењене температуре. Описани резултати објављени су у једном раду у врхунском међународном часопису:

- N. Plić, A. Džunuzović, J. Bobić, **B. Stojadinović**, P. Hammer, M. Vijatović Petrović, Z. Dohčević-Mitrović, B. Stojanović, “Structure and properties of chemically synthesized  $\text{BiFeO}_3$ . Influence of fuel and complexing agent”, *Ceram. Int.* 41 (2015) 69-77 (M21).

Широм примену  $\text{BiFeO}_3$  материјала ограничавају висока струја цурења и велики диелектрични губици, присуство секундарних фаза и мала реманентна поларизација. Побољшање физичких особина  $\text{BiFeO}_3$  материјала се постиже допирањем различитим елементима из групе прелазних метала и групе ретких земаља. У овом истраживању је испитиван утицај итријума као допанта на  $\text{BiFeO}_3$  керамику синтетисану методом самосагоревања. Анализе рендгенске дифракције и Раманове спектроскопије су показале да се делимични фазни прелаз из ромбодарске у орторомбичну структуру дешава у узорку са 10% Y. Такође је проучаван утицај допирања итријумом на микроструктуру методом скенирајуће електронске микроскопије, и уочено је смањење величине зрна у допираним узорцима. Електрична мерења су показала повећање електричног отпора са допирањем, док су вредности сатурационе и реманентне поларизације биле највеће у узорку са 5% Y. Допирање итријумом је довело до појаве слабог феромагнетизма у иначе антиферомагнетном материјалу. Кандидат је проучавао вибрационе особине  $\text{BiFeO}_3$  наноматеријала допираних са итријумом и утврдио да код допираних узорка долази до ширења и померања модова ка вишим енергијама, што потврђује субституциону уградњу лакшег Y јона на место Bi, и доводи до структурног прелазу из ромбодарске у орторомбичну фазу, чиме је потврђен резултат из мерења рендгенске дифракције. Кандидат је коришћењем метода спектроскопске елипсометрије одредио вредности енергијских процепца  $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$  узорка применом Тауцовог модела. Закључено је да са повећањем садржаја Y долази до повећања енергијског процепца у  $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$  узорцима. Овакво понашање је објашњено ефектом фонсонског ограничења услед смањења димензија наночестица са допирањем (уочено у мерењима скенирајуће електронске микроскопије). Описани резултати објављени су у једном раду у врхунском међународном часопису:

- N. Plić, J. Bobić, **B. Stojadinović**, A. Džunuzović, M. Vijatović Petrović, Z. Dohčević-Mitrović, B. Stojanović, “Improving of the electrical and magnetic properties of  $\text{BiFeO}_3$  by doping with yttrium”, *Mater. Res. Bull.* 77 (2016) 60-69 (M21).

Испитиване су структурне, оптичке и магнетне особине  $\text{BiFeO}_3$  нанопраха синтетисаног хидротермалном методом. Структура материјала је одређена анализом



рендгенске дифракције и показано је да је материјал кристалисао у ромбодарску  $R3c$  структуру. Урађена су и теоријска истраживања могућих структура  $\text{BiFeO}_3$  применом DFT метода, која су потврдила стабилност одређених фаза. Предложено је 11 додатних модификација  $\text{BiFeO}_3$  и извршена је *ab initio* оптимизација предвиђених структура, при чему је структура  $\gamma$ - форме разјашњена. Поред тога, спектроскопском елипсометријом су проучаване оптичке особине добијеног материјала и утврђен енергијски процеп у материјалу, док су магнетне особине испитане помоћу SQUID методе, из којих се закључило да локална магнетна својства чистих наночестица  $\text{BiFeO}_3$  углавном зависе од величине честица и њихове морфологије. Кандидат је испитивао оптичке особине  $\text{BiFeO}_3$  нанопраха синтетисаног хидротермалном методом и одредио енергијски процеп из измерене псеудодиелектричне функције применом Тауцовог модела. Описани резултати су објављени у једном раду у међународном часопису изузетних вредности:

- М. Ђебела, Д. Загорач, К. Балатовић, Ј. Радаковић, **В. Стојадиновић**, В. Спасојевић, Р. Херцигонја, "BiFeO<sub>3</sub> perovskites: A multidisciplinary approach to multiferroics", *Ceram. Int.* 43 (2017) 1256-1264 (M21a).

Кандидат се бавио и испитивањем утицаја холмијума као допанта на структурне, диелектричне, фeroелектричне и магнетне особине чистог и допираних  $\text{BiFeO}_3$  нанопрахова холмијумом ( $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$ ,  $0 \leq x \leq 0.15$ ) синтетисаних сол-гел методом. Установљено је да при већим концентрацијама допирања ( $x \geq 0.1$ ) узорци постају двофазни, тј. долази до делимичног структурног фазног прелаза из ромбодарске у орторомбичну  $Pnma$  фазу, која постаје доминантна у 15 mol% Но допираном узорку. Фреквентно зависна комплексна диелектрична пропустљивост  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$  нанопрахова на собној температури је анализирана помоћу комбинованог модела који укључује Кол-Кол (*Cole-Cole*) релаксациони модел и UDR (*Universal dielectric response*) модел да би се проценили ефекти струје цурења и поларизације просторног наелектрисања на укупну диелектричну пропустљивост. Утврђено је да је доминантно присуство орторомбичне  $Pnma$  фазе у  $\text{Bi}_{0.85}\text{Ho}_{0.15}\text{FeO}_3$  узорку утицало на смањење струје цурења и довело до значајног повећања поља пробоја у односу на остале  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$  нанопрахе. Испитивањем фeroелектричних особина  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$  нанопрахова, показано је да су фeroелектричне особине  $\text{Bi}_{0.85}\text{Ho}_{0.15}\text{FeO}_3$  узорка значајно побољшане у јаким пољима (50 kV/cm и 100 kV/cm) на ниским фреквенцијама. Уочена је изразита фреквенцијска зависност реманентне поларизација као и нагли пораст њене вредности са опадањем фреквенције. Закључено је да се у јаким пољима на ниским фреквенцијама дефектни комплекси, настали током процеса синтезе  $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$  узорака, лакше оријентишу дуж правца спонтане поларизације, прате процес преокретања поларизације домена и на тај начин доприносе побољшању својствене поларизације  $\text{Bi}_{0.85}\text{Ho}_{0.15}\text{FeO}_3$  узорка.  $\text{Bi}_{0.85}\text{Ho}_{0.15}\text{FeO}_3$  узорак испољава феромагнетно (ФМ) уређење на собној температури као и недопиран узорак. Присуство ФМ је последица нарушења антиферомагнетног уређења (које је карактеристично за недопиран  $\text{BiFeO}_3$  материјал у ромбодарској  $R3c$  фази) услед смањења димензије честица (кристалита) које постају мање од периода спинске циклоиде. Побољшање феромагнетних особина у односу на недопиран  $\text{BiFeO}_3$  је



последица додатног смањења димензије честица (кристалита) и присуства доминантне орторомбичне  $Pnma$  фазе. У орторомбичној фази долази до нагињања  $FeO_6$  октаедара и до значајније промене  $Fe-O$  веза и  $Fe-O-Fe$  угла између антиферомагнетно спрегнутих  $Fe$  јона, што проузрокује слабење суперизменске интеракције, нарушење спинске циклоиде и доводи до побољшања феромагнетних особина. Описани резултати објављени су у једном раду у међународном часопису изузетних вредности:

- **Bojan Stojadinović**, Zorana Dohčević-Mitrović, Dimitrije Stepanenko, Milena Rosić, Ivan Petronijević, Nikola Tasić, Nikola Ilić, Branko Matović, Biljana Stojanović, "Dielectric and ferroelectric properties of Ho-doped  $BiFeO_3$  nanopowders across the structural phase transition", *Ceram. Int.* 43 (2017) 16531-16538 (M21a).

Кандидат је испитивао и зрнасте танке  $BiFeO_3$  филмове синтетисане методом танких превлака са циљем да се детаљније проуче механизми проводности унутар зрна и на граници зрна који у великој мери одређују фероелектричне особине танких филмова. Скенирајућим техникама (AFM, PFM) показано је да димензија фероелектричних домена одговара димензији појединачних зрна. Струја цурења је израженија на границама зрна, а по први пут је уочена и појава хистерезиса у електричним особинама унутар зрна. Кандидат је коришћењем модела за описивање транспорта наелектрисања у полупроводницима испитивао природу механизма струје цурења унутар зрна и на граници зрна. Показано је да унутар зрна на нижим напонима доминира омска проводност, на средњим напонима Шоткијев механизам, а на вишим напонима Фаулер-Нортхаимов механизам провођења. Кандидат је показао да је струја цурења најизраженија на граници зрна, а за опис механизма провођења на граници зрна се није могао применити ни један познат модел транспорта наелектрисања. Локална електрична мерења на унутрашњости зрна су показала хистерезисно понашање при спорим променама напона, како у локалној густини стања, тако и у положају средине енергијског процепа, док на границама зрна није уочено хистерезисно понашање. Описани резултати објављени су у једном раду у врхунском међународном часопису:

- **B. Stojadinović**, B. Vasić, D. Stepanenko, N. Tadić, R. Gajić, Z. Dohčević-Mitrović, "Variation of electric properties across the grain boundaries in  $BiFeO_3$  film", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49 (2016) 045309 (M21).

### **2.3. Испитивање вибрационих, електричних и магнетних својстава феритних и титанатних наноматеријала**

Истраживана су својства композитних наноматеријала  $(NiZn)Fe_2O_4$  и  $BaTiO_3$  добијених методом самосагоревања. Анализе су обухватиле испитивање кристалне структуре, електричног отпора и магнетних својстава у зависности од састава материјала. Установљено је да микроструктурне карактеристике и присуство граница између зрна значајно утичу на својства материјала, укључујући магнетизацију и електричну отпорност. Рамановом спектроскопијом испитиване су вибрационе особине никл-цинк ферита и мултифероичног композита никл-цинк ферита и баријум титаната са променљивим односом никла и цинка у једињењу никл-цинк ферита. Код узорака никл-цинк ферита ( $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ,  $x=0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ ) синтетисаних



самосагоревајућом методом Раманове спектроскопије је потврђено доминантно присуство кубичне структуре. Може се закључити да метода самосагоревања за синтезу никл-цинк ферита даје наночестице без секундарних фаза, али има потребу за постизањем веће густине и отпорности материјала. У случају мултифероичних композита никл-цинк ферита и баријум титаната ( $(\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4-(1-y)\text{BT}$ ,  $x=0.3, 0.5, 0.7$ ,  $y=0.5$ ) синтетисаних самосагоревајућом методом, варијацијом односа никла-цинк ферита и баријум титаната могу се контролисати електрична и магнетна својства композита, при чему присуство баријум титаната утиче на смањење магнетизације, док је отпор највећим делом условљен границама зрна. Кандидат је мерио и анализирао Раманове спектре свих узорака и утврдио кристалну структуру материјала. Установљена је кубична структура са малим присуством секундарних фаза у свим узорцима. Описани резултати објављени су у једном раду у врхунском међународном часопису и једном раду у истакнутом међународном часопису:

- A. Džunuzović, M. Vijatović Petrović, **B. Stojadinović**, N. Ilić, J. Bobić, C. Foschini, M. Zaghete, B. Stojanović, "Multiferroic  $(\text{NiZn})\text{Fe}_2\text{O}_4\text{-BaTiO}_3$  composites prepared from nanopowders by auto-combustion method", *Ceram. Int.* 41 (2015) 13189-13200 (M21).
- A. S. Džunuzović, N. I. Ilić, M. M. Vijatović Petrović, J. D. Bobić, **B. Stojadinović**, Z. Dohčević-Mitrović, B. D. Stojanović, "Structure and properties of Ni-Zn ferrite obtained by auto-combustion method", *J. Magn. Mater.* 374 (2015) 245-251 (M22).

#### 2.4. Испитивање оптичких, фотокаталитичких и сензорских особина метал-оксидних наноматеријала

Анализиране су морфолошке, структурне и хемијске промене у  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  слојевима на алуминијуму синтетисаних помоћу поступка плазма електролитичке оксидације (ПЕО) као и њихова потенцијална примена у фотокаталитичкој разградњи азо боја. Резултати показују да дуже време процесирања резултира бољом фотокаталитичком активношћу слојева. Рамановом спектроскопијом су праћене промене у структурним и вибрационим особинама  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  слојева у зависности од времена деловања ПЕО процеса. На основу анализе Раманових спектра се закључило да су  $\text{ZnO}$  наночестице присутне у оксидним превлакама и да је оксид алуминијума претежно  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фазе. Такође је уочено проширење главног  $E_2$  мода  $\text{ZnO}$  што указује на присуство  $E_g$  мода који припада  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  фази. Описани резултати су објављени у једном раду у врхунском међународном часопису:

- S. Stojadinović, N. Tadić, N. Radić, **B. Stojadinović**, B. Grbić, R. Vasilić, "Synthesis and characterization of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  coatings formed by plasma electrolytic oxidation", *Surf. Coat. Tech.* 276 (2015) 573-579 (M21).

Испитиван је ласерски третиран  $\text{TiO}_2$  филм, анатас фазе, коришћењем високоенергетског ласерског зрачења при чему се варирала упадна снага ласера. Испитивања су обухватала карактеризацију промена у дебљини филма, структури, механичким својствима и електричној проводљивости током процеса ласерског



третмана уз помоћ оптичке и електронске микроскопије, Раманове спектроскопије и струјно-напонских мерења. Резултати су указали на значајно побољшање механичких својстава и електричне проводности ласерски синтерованих  $\text{TiO}_2$  узорака, уз очување анатас кристалне структуре. Испитивања површинске морфологије штампаних филмова открила су да ласерски третман узрокује додатно испаравање органских адитива у пасти матрице, што значајно смањује дебљину филма. Енергетски дисперзивном рендгенском спектроскопијом је потврђено уклањање органских адитива из мапирања садржаја угљеника у ласерски третираним узорцима. Ласерски третман је додатно допринео разбијању великих агломерата у знатно финије наночестице и побољшао формирање веза између појединачних зрна. Рамановом спектроскопијом су испитане вибрационе особине ласерски синтерованих  $\text{TiO}_2$  танких филмова у којима је утврђено доминантно присуство анатас фазе. Денковолуцијом Раманових модова Лоренцијанским профилима утврђен је померај ка вишим енергијама и смањење интензитета, тј. повећање ширине модова у ласерски третираним  $\text{TiO}_2$  танким филмовима. У литаратури је познато да се смањење интензитета, тј. повећање ширине Раманових модова може приписати појави кисеоничних ваканција. Ови резултати указују да ласерски третман не нарушава кристалну структуру наночестица  $\text{TiO}_2$ , али долази до настанка структурних дефеката у облику кисеоничних ваканција, чија се концентрација повећава са повећањем снаге ласера. Механичке особине узорака су испитане мерењима под различитим оптерећењима, како би се одредио Јунгов модул и механичка тврдоћа материјала. Струјно-напонска мерења јасно су показала да са повећањем снаге ласера долази до драстичног повећања вредности струје и побољшања електричне проводности филмова, што је последица формирања веза између појединачних наночестица и смањења границе између зрна. Побољшање проводности у режиму једносмерне струје је кључно за оптималну употребу ових материјала у гасним сензорима и фотоволтаичним уређајима. Кандидатов допринос овом раду је био у мерењу, обради података и анализи Раманових спектра. Описани резултати објављени су у једном раду у међународном часопису изузетне вредности:

- М. Radović, G. Dubourg, S. Kojić, Z. Dohčević-Mitrović, **B. Stojadinović**, M. Bokorov, V. Crnojević-Begnin, „Laser sintering of screen-printed  $\text{TiO}_2$  nanoparticles for improvement of mechanical and electrical properties“, *Ceram. Int.* 44 (2018) 10975-10983 (M21a).

Истраживани су наноматеријали Mg допираних  $\text{CeO}_2$  нанопрахова синтетисаних SPRT методом у циљу побољшања фотокаталитичких особина  $\text{CeO}_2$  при разградњи органских азо боја под UV светлости. Рендгенска анализа и електронска микроскопија су показали да су чисти и допирани узорци флуоритне структуре и сферног облика честица. Рамановом спектроскопијом су се испитивале вибрационе особине чистих и допираних нанопрахова. Раманови спектри су показали да се у  $\text{CeO}_2$  нанопраховима, поред карактеристичног мода  $\text{CeO}_2$  флуоритне кубичне структуре на око  $455 \text{ cm}^{-1}$ , јавља мод на око  $600 \text{ cm}^{-1}$  који се приписује појави кисеоничних ваканција. Интензитет овог мода, који је пропорционалан концентрацији ваканција, расте са допирањем магнезијумом. Вредност енергијског процепца Mg допираних  $\text{CeO}_2$  нанопрахова је процењена моделовањем елипсометријских спектра и коришћењем Тауцовог модела за директан прелаз. Закључено је да енергијски процеп опада са повећањем садржаја



Mg због формирања локализованих стања унутар енергијског процепа  $\text{CeO}_2$  која потичу од  $\text{Mg}^{2+}$  јона и кисеоничних ваканција. Фотокаталитичке особине ових материјала су испитиване коришћењем UV зрачења при разградњи органске боје. Допирани узорци су показали знатно боље фотокаталитичке перформансе у разградњи азо боја у односу на недопиран узорак. Побољшање фотокаталитичке активности је објашњено формирањем локализованих дефектних стања унутар енергијског процепа церијум диоксида која заробљавају фото-генерисане носиоце наелектрисања, чиме се спречава брз процес рекомбинације. На тај начин је омогућен трансфер наелектрисања ка адсорбованим молекулима, као што су  $\text{O}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}$ , на површини  $\text{CeO}_2$  и настанак реактивних радикала. Кандидат се бавио мерењем и детаљном анализом и моделовањем вибрационих и оптичких особина Mg допираних  $\text{CeO}_2$  нанопрахова, коришћењем метода Раманове спектроскопије и спектроскопске елипсометрије. Описани резултати објављени су у једном раду у истакнутом међународном часопису:

- В. Matović, J. Luković, **В. Stojadinović**, S. Aškračić, A. Zarubica, B. Babić, Z. Dohčević-Mitrović, "Influence of Mg doping on structural, optical and photocatalytic performances of ceria nanopowders", *Process. Appl. Ceram.* 11 (2017) 304-310 (M22).

## **2.5. Испитивање механизма провођења у мултифероичном $\text{BiFeO}_3$ наноматеријалу методом Раманове спектроскопије**

Транспортна својстава тј. механизми провођења у мултифероичним наночестицама  $\text{BiFeO}_3$  синтетисаним сол-гел методом су испитивани Рамановом спектроскопијом. Из температурно-зависних Раманових спектра се анализирао континуални спектрални позадински сигнал познат као Раманово електронско позадинско расејање (electronic Raman background). Ова анализа је омогућила безконтактно праћење промена у проводности са температуром. Показано је да постоје два транспортна режима у  $\text{BiFeO}_3$  наночестицама која одговарају тзв. Variable Range Hopping (VRH) механизму, при којем носиоци наелектрисања прескачу између локализованих стања. Прелаз из једног у други режим се одвија на магнетном фазном прелазу из антиферомагнетног (АФ) у парамагнетно (ПМ) стање на температури од око 640 К. Ефрос-Шкловски VRH механизам доминира на ниским температурама и присутан је у АФ фази, док је Мотов VRH механизам заступљен на вишим температурама у ПМ фази. Процењена је и густина локализованих стања из високо-температурне ПМ фазе. Такође је значајно напоменути да је отпорност  $\text{BiFeO}_3$  наночестица изузетно висока и износи отприлике 350  $\text{m}\Omega\text{cm}$ , што прелази критичну вредност за метале познату као Мот Јофе Регел критеријум. Ова висока вредност отпорности указује на то да се електрични транспорт не одвија кроз проводну зону, као и да  $\text{BiFeO}_3$  спада у класу лоших проводника. Кандидат је дао значајан допринос овом раду, синтетисао је материјал, измерио и моделовао Раманове спектре, и активно учествовао у дискусији и анализи резултата. Описани резултати су објављени у једном раду у међународном часопису изузетне вредности:



- Dejan M. Djokić, Bojan Stojadinović, Dimitrije Stepanenko, Zorana Dohčević-Mitrović, “Probing charge carrier transport regimes in BiFeO<sub>3</sub> nanoparticles by Raman spectroscopy”, Scripta Mater. 181 (2020) 6-9 (M21a).

## 2.6. Испитивање спин-фонон интеракције у мултифероичним BiFeO<sub>3</sub> и Dy<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> наноматеријалима

Материјали попут бизмут ферита и феримагнетних гвожђе гарнета са ретким земљама привлаче пажњу истраживача због својих јединствених оптичких, магнетних и електричних својстава, и налазе све већу примену у развоју магнето-оптичких и фотоволтаичних уређаја, микроталасних кола и сензора магнетних поља. Наноструктурне форме ових материјала се данас све више проучавају због постојања необичних и комплексних магнетних особина. Посебно је интересантно да се испитају интеракције спина са вибрацијама решетке у овим материјалима, што може значајно утицати на магнето-оптичке особине и њихову потенцијалну примену у спинтроници. Кандидат је проучавао спин-фонон интеракцију у антиферомагнетним нанокристалима BiFeO<sub>3</sub>, синтетисаним сол-гел методом, коришћењем Раманове спектроскопије. Испитивана је температурна зависност Раманових резонантно појачаних дво-фононских модова (коришћењем резонантне ласерске побуде,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) изнад и испод Нелове температуре ( $T_N$ ). Испод  $T_N$ , два дво-фононска мода су показала аномално повећање фреквенције и одступање од анхармонијског понашања. Ово додатно отврдњавање дво-фононских модова се није могло објаснити трофононским моделом за анхармонијске фонон-фонон интеракције, што је био јасан показатељ да су испитивани дво-фононски модови осетљиви на магнетно уређење. Два поменута мода у BiFeO<sub>3</sub> су литературно позната по великој осетљивости на антиферомагнетно уређење, јер представљају вибрације атома гвожђа и кисеоника (Fe-O вибрације) у FeO<sub>6</sub> октаедрима, а такође су повезане и са ротацијама октаедара у кристалној структури BiFeO<sub>3</sub>. Познато је да промене у међуатомским силама и угловима Fe-O-Fe веза могу утицати на магнетно уређење овог материјала и доводе до појаве и феромагнетне фазе. Применом теорије средњег поља (*Mean field theory*) и Хајзенберговог модела за опис интеракције између најближих суседних магнетних јона, успостављена је линеарна веза између спинске корелационе функције и додатног помераја фреквенције дво-фононских модова испод  $T_N$ . То је омогућило квантификацију спин-фонон интеракције, односно одређивање јачине спин-фонон спрезања за оба дво-фононска мода, и оправдало примену теорије средњег поља. Из магнетних мерења је поред доминантне антиферомагнетне фазе установљено и присуство слабе феромагнетне фазе испод  $T_N$ . Показано је да ове две магнетне интеракције нису компетитивне, тј. нема појаве магнетних фрустрација, као и да кооперативно утичу на формирање стабилне АФМ фазе испод  $T_N$ . Ови закључци су додатно подржали примену предложеног модела за анализу спин-фонон интеракције у BiFeO<sub>3</sub> нанокристалима.

У нанокристалним феримагнетним Dy<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> честицама, синтетисаним сол-гел методом, кандидат је проучавао утицај различитих магнетних уређења (антиферомагнетно и феромагнетно) на температурну еволуцију Раманових модова.



Рендгенском дифракцијом, Рамановом спектроскопијом и трансмисионом електронском микроскопијом анализирани су структурне, вибрационе и морфолошке особине  $Dy_3Fe_5O_{12}$  нанокристала. Анализа и моделовање температурно-зависних Раманових спектра су показали да на температурама испод магнетног фазног прелаза ( $T_C$ ), четири фононска мода из средњег и високофреквентног региона имају аномално понашање, тј. фреквенције ових модова значајно одступају од анхармонијског тропараметарског модела за фонон-фонон интеракције. Такође је запажено да модови који претежно представљају тетраедарске ( $FeO_4$ ) вибрације (370, 674 и  $703\text{ cm}^{-1}$  модови) имају негативан фреквентни померај у односу на анхармонијску криву, док је за вибрације које укључују вибрације  $Dy$  и  $Fe^T$  (тетраедарски  $Fe$  јона) магнетних јона ( $411\text{ cm}^{-1}$  мод) добијен позитиван фреквентни померај. Пошто овај материјал има две магнетне подрешетке са различитим магнетним уређењем и са комплексним магнетним интеракцијама, аномално понашање фононских модова је приписано појави спин-фонон интеракције. Користећи Хајзенбергов модел за спин-спин интеракцију између најближих суседних магнетних јона код феромагнетног и/или антиферомагнетног уређења, омогућено је да се успостави веза додатног фреквентног помераја у односу на анхармонијско понашање и спинске корелационе функције. Применом теорије средњег поља, узимајући у обзир интеракцију између најближих суседних магнетних јона, показано је да се за сва четири мода додатни померај фреквенције веома добро скалира са квадратом нормализоване магнетизације. Из линеарне везе додатног фреквентног помераја и спинске корелационе функције је квантитативно процењена јачина спин-фонон интеракције ( $\lambda$ ) за сва четири мода. Добијене вредности  $\lambda$  за сва четири мода се разликују по величини, а за мод  $411\text{ cm}^{-1}$  је добијена вредност  $\lambda$  и супротног знака. Показано је да је спин-фонон интеракција најјача код модова који одговарају вибрационим и ротационим модовима  $FeO_4$  тетраедара (370, 674 и  $703\text{ cm}^{-1}$  модови). Ови модови су осетљиви на јаку феромагнетну  $Fe^T$ -O- $Fe^T$  интеракцију између најближих суседних  $Fe^T$  јона. За ове модове су добијене негативне вредности  $\lambda$  што је у сагласности са коришћеним моделом. Насупрот овим модовима, модови који одговарају вибрацијама  $Dy$  и  $Fe^T$  магнетних јона су осетљивији на антиферомагнетну  $Dy$ -O- $Fe^T$  интеракцију између  $Dy$  и  $Fe^T$  јона и слабије су спрегнути са магнетним уређењем, што је потврђено кроз вредност и позитиван предзнак константе спрезања  $\lambda$ . Закључено је да релативна спрега ФМ или АФМ интеракције са одређеним Рамановим модовима као и јачина спреге зависе од типа вибрација. Описани резултати објављени су у два рада у врхунским међународним часописима:

- **Bojan Stojadinović, Dejan M. Djokić, Novica Paunović, Ivica Živković, Luka Ćirić, Vladan Kusigerski, Zorana Dohčević-Mitrović, “Unveiling the spin-phonon coupling in nanocrystalline  $BiFeO_3$  by resonant two-phonon Raman active modes”, Mater. Sci. Eng. B, 274 (2021) 115444 (M21).**
- **Bojan Stojadinović, Zorana Dohčević-Mitrović, Sonja Aškračić, Novica Paunović, M. T. Rahul, B. Raneesh, Nandakumar Kalarikkal, “Spin-phonon interaction in nanocrystalline  $Dy_3Fe_5O_{12}$  probed by Raman spectroscopy: Effects of magnetic ordering”, J. Sci.: Adv. Mater. Devices, 8 (2023) 100600 (M21).**



## 2.7. Испитивање коегзистенције фероелектричних и антифероелектричних особина $\text{NaNbO}_3$ влакана Рамановом и пиезоелектричном микроскопијом

У студији на  $\text{NaNbO}_3$  нановлакнима орторомбичне структуре са пиезоелектричним својствима, која су синтетисана микроталасно потпомогнутом хидротермалном методом, карактеризација структурних особина је урађена уз помоћ рендгенске дифракције. Риетвалдова анализа структуре  $\text{NaNbO}_3$  нановлакна је показала постојање антифероелектричне ( $Pbcm$ ) - АФЕ и фероелектричне ( $P2_1ma$ ) - ФЕ фазе на собној температури. Резултати Раманове спектроскопије су пружили додатни увид  $\text{NaNbO}_3$  орторомбичне структуре нановлакна и потврдили резултате рендгенске дифракције. Из анализе температурно-зависних Раманових спектра, утврђено је постојање модова који припадају и АФЕ ( $Pbcm$ ) и ФЕ ( $P2_1ma$ ) орторомбичној фази. Показано је да се интензитет појединих вибрацијских модова, који се могу приписати ФЕ или АФЕ фази, мења са температуром. На основу промена интензитета ових модова је показано да повећање температуре фаворизује веће присуство ФЕ фазе у орторомбичној структури  $\text{NaNbO}_3$ , иако обе фазе коегзистирају при свим температурама. На тај начин је анализа температурно-зависних Раманових спектра омогућила боље разумевање фазног прелаза у овом материјалу. Теоријске DFT симулације су показале да се релативна стабилност између АФЕ и ФЕ фазе  $\text{NaNbO}_3$  нановлакна може променити под утицајем електричног поља, зависно од оријентације поља у односу на влакна и да се прелаз из АФЕ у ФЕ фазу дешава при јачим електричним пољима него код  $\text{NaNbO}_3$  прашкастих материјала и монокристала. Пиезоелектрична микроскопија (PFM) је потврдила ове резултате показавши да свака појединачна честица садржи регионе са фероелектричним и нефероелектричним карактеристикама, чиме се додатно потврђују резултати рендгенске и Раманове анализе. Осим тога, теоријска DFT анализа је сугерисала да присутност фазе без фероелектричних особина може имати неке карактеристике антифероелектричне фазе. Описани резултати објављени су у једном раду у врхунском међународном часопису:

- Guilhermina Ferreira Teixeira, Heitor Secco Seleghini, Wagner Benício Bastos, Natalia Jacomaci, Bojan Stojadinović, Zorana Dohčević-Mitrović, Flavio Colmati, Miguel Angel San-Miguel, Elson Longo and Maria Aparecida Zaghete, "On the coexistence of ferroelectric and antiferroelectric polymorphs in  $\text{NaNbO}_3$  fibers at room temperature", J. Mater. Chem. C, 11 (2023) 5524 (M21).

## 2.8. Испитивање сензорских и фотокаталитичких особина нанопрахова чистог $\text{SnO}_2$ и допираног кобалтом

Испитивани су структура и сензорска својства  $\text{SnO}_2$  нанолистова на различите гасове као и њихова способност детекције ултраљубичастог зрачења.  $\text{SnO}_2$  нанолистови су синтетисани хидротермалном методом и нанесени на флексибилни супстрат са интердигиталним електродама да би се направио сензор. Циљ истраживања био је развој иновативног приступа у синтези, карактеризацији и примени  $\text{SnO}_2$  наноматеријала у напредним технологијама, са посебним нагласком на сензорске примене у детекцији гасова и ултраљубичастог зрачења (UVA). Рендгенска



дифракција, Раманова спектроскопија и електронска микроскопија су показале да је синтетисани материјал микрометарских димензија кристалисао у рутилну структуру која поседује дефекте у виду кисеоничних ваканција. Дефектна структура се испитивала Рамановом спектроскопијом. У Рамановом спектру се поред модова карактеристичних за рутилну структуру појављује карактеристичан и интензиван мод на око  $580 \text{ cm}^{-1}$  који одговара моду кисеоничних ваканција и њиховој повећаној концентрацији. Кисеоничне ваканције играју важну улогу у својствима  $\text{SnO}_2$  наноматеријала, посебно у контексту сензора, оне могу деловати као места где се адсорбују гасови, што може променити електрична својства материјала и утицати на сензорске перформансе. Ово је од посебног значаја, јер се концентрација ваканција може прилагодити током синтезе како би се постигле жељене карактеристике сензора. У импедансним мерењима се уочава само једно време релаксације карактеристично за међуфазну поларизацију, која потиче од контактних површина између  $\text{SnO}_2$  нанолистова. Сензор направљеном од  $\text{SnO}_2$  нанолистова је показао веома добру проводљивост и линеарну зависност струје од примењеног напона. Дизајнирани сензор је показао добар одзив на етанол у поређењу са 2-пропанолом и ацетоном, што указује на добру селективност  $\text{SnO}_2$  нанолистова. Штавише, сензор се одликује високом фотострујом односно веома ефикасном фотоконверзијом, што је погодно за примену у мониторингу UVA зрачења. Кандидат је урадио Раман мерења и анализу и тумачење резултата дефектне структуре  $\text{SnO}_2$  нанолистова.

Ултрафини  $\text{SnO}_{2-\delta}$  нанопрахови, чисти и допирани кобалтом ( $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ ,  $0 \leq x \leq 0.05$ ) су синтетисани микроталасно потпомогнутом хидротермалном методом у циљу да се испита утицај кобалта на структурне, електронске, оптичке и фотокаталитичке особине овог материјала. Кристална структура  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наноправова је испитана рендгенском дифракцијом. Резултати рендгенске карактеризације су показали да су добијени нанокристали једнофазне тетрагоналне рутилне структуре. Коришћењем Шереровог метода је показано да су димензије кристалита  $\text{SnO}_{2-\delta}$  наноправова мање од Боровог ексцитонског радијуса за овај материјал. Допирање кобалтом доводи до смањења димензије кристалита у односу на недопиран узорак, што указује да присуство кобалта доводи до спречавања раста  $\text{SnO}_{2-\delta}$  кристалита. Такође је установљено да код узорка са повећаним садржајем кобалта ( $\text{Sn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ ), кобалт улази у  $\text{SnO}_{2-\delta}$  решетку у стањима мешане валенце ( $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ ). ТЕМ анализа је показала да су чисти и допирани узорци састављени из кристалних наночестица сферне морфологије и малих димензија испод 3 nm, што је у сагласности са резултатима рендгенске анализе. UV-VIS апсорпциона мерења су показала да се најинтензивнија апсорпциона трака, која одговара прелазу из валентне у проводну зону код  $\text{SnO}_{2-\delta}$ , помера ка нижим таласним дужинама, што значи да се са допирањем кобалтом повећава енергијски процеп  $\text{SnO}_2$ . На узорцима који садрже 3% и 5% кобалта, уочава се појава нових трака које одговарају присуству  $\text{Co}^{3+}$  јона чија концентрација расте са допирањем. Такође су се у UV-VIS спектру са повећањем процента допанта (3% и 5% Co), поред трака које одговарају  $\text{Co}^{2+}$  стањима, појавиле нове траке које одговарају и  $\text{Co}^{3+}$  стањима. Ови резултати су у потпуној сагласности са резултатима рендгенске дифракције. Анализа Рамановог спектра недопираног  $\text{SnO}_{2-\delta}$  узорка је потврдила рутилну структуру, али и указала на постојање два нова мода: интензивног мода на око



574  $\text{cm}^{-1}$  и новог мода на око 430  $\text{cm}^{-1}$  који се иначе не јављају у монокристалним узорцима  $\text{SnO}_2$ . Ови модови се приписују појави кисеоничних ваканција у решетки  $\text{SnO}_{2-\delta}$ , које представљају најчешће дефекте у рутилној структури. Мод на око 574  $\text{cm}^{-1}$  је тзв. in-plane мод кисеоничних ваканција ( $V_{\text{Oin}}$ ), док мод на око 430  $\text{cm}^{-1}$  одговара формираним кластерима ваканција ( $V_{\text{C}}$ ). Моделовањем Раманових спектра допираних  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  узорака је показано да интензитети Раманових модова ваканција опадају са допирањем, што указује на смањење концентрације кисеоничних ваканција у допираним узорцима. Фотолуминесцентна спектроскопија је коришћена у циљу испитивања типа кисеоничних дефеката у  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наноправовима. Урађено је моделовање и деконволуција фотолуминесцентних (ФЛ) спектра  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наноправова. Ови резултати су потврдили дефектну структуру  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наноправова и закључке анализе Раманових спектра, али и пружили бољи увид у тип дефеката и релаксационе процесе. Показано је да најинтензивнија ФЛ трака у недопираним узорцима потиче од  $V_{\text{Oin}}$  ваканција. Остале две ФЛ траке потичу од једноструко јонизованих кисеоничних ваканција (тзв.  $F^+$  дефекти) и  $V_{\text{OSB}}$  ваканција, чија се стања налазе дубоко у енергетском процепу. Ови резултати су помогли да се предложи модел за релаксационе процесе у  $\text{SnO}_{2-\delta}$  наноматеријалима. Допирање кобалтом је довело до драстичног смањења интензитета ФЛ модова ових типова ваканција и гашења луминесценције што је такође у сагласности са закључцима Раманове анализе. Спектроскопском елипсометријом се анализирао тип енергијског процепа  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  нанокристала и показано је да ови узорци имају директан процеп. Са повећањем концентрације  $\text{Co}$  долази до значајног померања енергијског процепа ка вишим енергијама у сагласности са анализом UV-VIS апсорпционих спектра. Овакво понашање је објашњено смањењем димензије кристалита (ефекат квантног ограничења) и повећањем густине наелектрисања (Брнштајн-Мосов померај) услед присуства донорских дефеката у виду кисеоничних ваканција, али и услед повећане концентрације  $\text{Co}$  јона. Недопирани  $\text{SnO}_{2-\delta}$  наноправова су показали знатно бољу фотокаталитичку активност при разградњи азо боја под UV светлошћу у поређењу са допираним узорцима. То се може објаснити бољом апсорпцијом UV светлости и повећаном концентрацијом кисеоничних ваканција које формирају стања близу проводне (донорски нивои) или валентне зоне (акцепторски нивои) у зависности од типа дефекта. Ова стања заробљавају електроне или шупљине, спречавају њихову брзу рекомбинацију, омогућавајући бржи транспорт наелектрисања ка површини наночестица и формирање радикала неопходних за разградњу азо боја. Резултати ових истраживања су објављени у једном раду у врхунском међународном часопису и у једном раду у истакнутом међународном часопису:

- M. Radović, G. Dubourg, Z. Dohčević-Mitrović, B. Stojadinović, J. Vukmirović, N. Samardžić, M. Bokorov, "SnO<sub>2</sub> nanosheets with multifunctional properties for flexible gas-sensors and UVA light detectors", J. Phys. D: Appl. Phys. 52 (2019) 385305 (M21).
- Zorana D. Dohčević-Mitrović, Vinicius D. Araújo, Marko Radović, Sonja Aškračić, Guilherme R. Costa, Maria Ines B. Bernardi, Dejan M. Djokić, Bojan Stojadinović, Marko G. Nikolić, "Influence of oxygen vacancy defects and cobalt doping on



optical, electronic and photocatalytic properties of ultrafine SnO<sub>2-δ</sub> nanocrystals”, Process. Appl. Ceram. 14 (2020) 102-112 (M22).

## **2.9. Примена Раманове спектроскопије у испитивању биолошких узорака**

Истраживана је употреба липозома за заштиту осетљивих компоненти из семена *Rosa canina* L уља и продужење њиховог века трајања. Анализирана је величина честица, индекс полидисперситета, зета потенцијал, проводљивост, густина, површински напон, вискозност и стабилност липозома. Такође је применом Раманове и инфрацрвене спектроскопије проучаван хемијски састав, као и присуство различитих интеракција нетретираних и УВ-третираних узорака. Испитане су и антиоксидативне и антимикробне активности. Закључак рада указује на стабилност узорака липозома који садрже уље, али и на ниску антиоксидативну способност ових липозома. Предложено је истраживање примене ових липозома у фармацеутским и козметичким препаратима, посебно у контексту ефеката на регенерацију коже. Резултати овог истраживања су објављени у једном раду у истакнутом међународном часопису:

- Aleksandra A. Jovanović, Danica Čujić, Bojan Stojadinović, Natalija Čtović, Jelena Živković, Katarina Šavikin, “Liposomal Bilayer as a Carrier of Rosa canina L. Seed Oil: Physicochemical Characterization, Stability, and Biological Potential”, Molecules 28 (2023) 276 (M22).

## **3. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАЛИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА**

### **3.1. Квалитет научних резултата**

#### **3.1.1. Научни ниво и значај резултата, утицај научних радова**

Кандидат је до сада објавио укупно 23 рада у међународним часописима, од тога је 6 радова из категорије међународних часописа изузетних вредности (M21a), 11 радова из категорије врхунских међународних часописа (M21), 2 поглавља (M13) у тематском зборнику водећег међународног значаја, 4 рада из категорије истакнутих међународних часописа (M22).

У изборном периоду, кандидат је објавио укупно 7 радова у међународним часописима и 2 поглавља (M13) у тематском зборнику водећег међународног значаја. Поред објављивања у поменутих часописима, кандидат је најзначајније резултате представио на предавању по позиву и саопштењима на међународним научним скуповима.

#### **Најзначајније публикације кандидата у изборном периоду**

Најзначајнији радови кандидата у изборном периоду (број цитата на основу базе SCOPUS) су:



[1] Bojan Stojadinović, Zorana Dohčević-Mitrović, Sonja Aškračić, Novica Paunović, M. T. Rahul, B. Raneesh, Nandakumar Kalarikkal, “Spin-phonon interaction in nanocrystalline  $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  probed by Raman spectroscopy: Effects of magnetic ordering”, *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*, 8 (2023) 100600,  
импакт фактор: 7.382,  
категорија: M21,  
број цитата: 0,  
doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100600.

[2] Bojan Stojadinović, Dejan M. Djokić, Novica Paunović, Ivica Živković, Luka Ćirić, Vladan Kusigerski, Zorana Dohčević-Mitrović, “Unveiling the spin-phonon coupling in nanocrystalline  $\text{BiFeO}_3$  by resonant two-phonon Raman active modes”, *Mater. Sci. Eng. B*, 274 (2021) 115444,  
импакт фактор: 4.706,  
категорија: M21,  
број цитата: 1,  
doi: 10.1016/j.mseb.2021.115444.

[3] Guilhermina Ferreira Teixeira, Heitor Secco Seleghini, Wagner Benício Bastos, Natalia Jacomaci, Bojan Stojadinović, Zorana Dohčević-Mitrović, Flavio Colmati, Miguel Angel San-Miguel, Elson Longo and Maria Aparecida Zaghete, “On the coexistence of ferroelectric and antiferroelectric polymorphs in  $\text{NaNbO}_3$  fibers at room temperature”, *J. Mater. Chem. C*, 11 (2023) 5524,  
импакт фактор: 8.067,  
категорија: M21,  
број цитата: 0,  
doi: 10.1039/d2tc04039e.

[4] Zorana D. Dohčević-Mitrović, Vinicius D. Araújo, Marko Radović, Sonja Aškračić, Guilherme R. Costa, Maria Ines B. Bernardi, Dejan M. Djokić, Bojan Stojadinović, Marko G. Nikolić, “Influence of oxygen vacancy defects and cobalt doping on optical, electronic and photocatalytic properties of ultrafine  $\text{SnO}_{2-\delta}$  nanocrystals”, *Process. Appl. Ceram.* 14 (2020) 102-112,  
импакт фактор: 1.330,  
категорија: M22,  
број цитата: 11,  
doi: 10.1016/B978-0-12-820558-7.00001-7.

[5] Bojan Stojadinović, Sonja Aškračić, Novica Paunović, Dejan Djokić, Zorana Dohčević-Mitrović, *Spin-phonon coupling in nanostructures revealed by Raman spectroscopy*, 6<sup>th</sup> Conference of the Serbian Society for Ceramic Materials, Belgrade, Serbia, I-8, page 26, June 2022, категорија: M32.

У првој публикацији, ([doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100600](https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100600)), проучавани су ефекти магнетног уређења на температурну еволуцију Раманових модова у нанокристалном  $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , синтетисаном сол-гел методом. Анализа резултата рендгенске дифракције и трансмисионе електронске микроскопије је потврдила чисту кубичну структуру и нанокристалну природу материјала. Посебна пажња била је усмерена на испитивање



механизма интеракције спина са вибрацијама решетке у нанокристалном  $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , будући да ова интеракција може знатно утицати на магнетоелектричне и мултифероичне особине материјала. Мерењем и анализом Раманових спектра на различитим температурама, показано је да на температурама испод магнетног фазног прелаза ( $T_C$ ), четири фононска мода из средњег и високофреквентног региона имају значајно одступање од класичног анхармонијског понашања. Модови који претежно представљају тетраедарске ( $\text{FeO}_4$ ) вибрације (370, 674 и 703  $\text{cm}^{-1}$  модови) имају негативан фреквентни померај у односу на анхармонијску криву, док модови који одговарају вибрацијама  $\text{Dy}$  и  $\text{Fe}^T$  (тетраедарски  $\text{Fe}$  јони) магнетних јона (411  $\text{cm}^{-1}$  мод) имају позитиван фреквентни померај. Знајући да овај материјал има две магнете подрешетке са различитим магнетним уређењем (АФМ и ФМ) и са комплексним магнетним интеракцијама, аномално понашање модова испод  $T_C$  је указало на појаву спин-фонон интеракције. Користећи Хајзенбергов модел за спин-спин интеракцију између најближих суседних магнетних јона код феромагнетног и/или антиферомагнетног уређења, успостављена је веза додатног фреквентног помераја у односу на анхармонијско понашање и спинске корелационе функције за сва четири мода. Применом теорије средњег поља је показано да се додатни померај фреквенције за сва четири Раманова мода добро скалира са квадратом нормализоване магнетизације. Из линеарне зависности додатног фреквентног помераја и спинске корелационе функције је квантитативно процењена јачина спин-фонон интеракције ( $\lambda$ ) за сва четири мода. Спин-фонон интеракција је најјача код модова који одговарају вибрационим и ротационим модовима  $\text{FeO}_4$  тетраедара (370, 674 и 703  $\text{cm}^{-1}$  модови), а добијене негативне вредности  $\lambda$  имплицирају да су ови модови осетљиви на јаку феромагнетну  $\text{Fe}^T\text{-O-Fe}^T$  интеракцију између најближих суседних  $\text{Fe}^T$  јона, што је у сагласности са коришћеним моделом. Мод на 411  $\text{cm}^{-1}$  је описан вибрацијама  $\text{Dy}$  и  $\text{Fe}^T$  магнетних јона. Доминантна магнетна интеракција између  $\text{Dy}$  и  $\text{Fe}^T$  јона је антиферомагнетна  $\text{Dy-O-Fe}^T$  интеракција. Позитивно добијена вредност  $\lambda$  за овај мод имплицира да је он доминантно спрегнут са АФМ уређењем. Пошто четири разматрана мода потичу од различитих вибрација између магнетних јона, закључено је да су релативна јачина спреге ФМ или АФМ интеракције са одређеним Рамановим модовима уско повезани са типом вибрације одређеног мода. Кандидат је у овом раду дао кључан допринос у свим фазама рада, почевши од мерења, анализе и моделовања температурно зависних Раманових спектра, моделовања и квантификације спин-фонон интеракције и писања рада. Кандидатов рад из ове области представља фундаментални допринос разумевању механизма спин-фонон интеракције у гарнетима.

У другој публикацији, ([doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115444](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115444)), проучавана је спин-фонон интеракцију у антиферомагнетним  $\text{BiFeO}_3$  нанокристалима коришћењем Раманове спектроскопије. Испитивали су се ефекти АФМ уређења на резонантно појачане двофононске Раманове модове на различитим температурама изнад и испод Нелове температуре  $T_N$ , користећи резонантну ласерску екситацију ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ). Испод  $T_N$ , два дво-фононска мода су показала аномално повећање фреквенције и одступање од анхармонијског понашања. Ово додатно отврдњавање дво-фононских модова је приписано спин-двофонон интеракцији, јер се није могло објаснити трофононским



моделом за анхармонијске фонон-фонон интеракције. Из литературе је познато да су ови двофононски модови осетљиви на антиферомагнетно уређење, јер представљају вибрације атома гвожђа и кисеоника (Fe-O вибрације) у FeO<sub>6</sub> октаедрима, а такође су повезани и са ротацијама октаедара у кристалној структури BiFeO<sub>3</sub>. Применом теорије средњег поља (*Mean field theory*) и Хајзенберговог модела за опис интеракције између најближих суседних магнетних јона, показано је да се додатни фреквентни померај двофононских модова скалира са квадратом нормиране магнетизације и успостављена је линеарна веза између спинске корелационе функције и додатног помераја фреквенције дво-фононских модова испод T<sub>N</sub>. Овакав приступ је омогућио да се по први пут процени јачина спин-фонон спрезања у BiFeO<sub>3</sub> материјалу. Из магнетних мерења је поред доминантне антиферомагнетне фазе установљено и присуство слабе феромагнетне фазе. Показано је да ове две магнетне интеракције нису компетитивне, тј. нема појаве магнетних фрустрација, као и да кооперативно утичу на формирање стабилне АФМ фазе испод T<sub>N</sub>. Ови закључци су додатно подржали примену предложеног модела за анализу спин-фонон интеракције у BiFeO<sub>3</sub> нанокристалима. Кандидат је у овом истраживању синтетисао материјал, осмислио експеримент, измерио, анализирао и моделовао Раманове спектре и дао доминантан допринос у дискусији резултата и писању рада.

У трећој публикацији, ([doi.org/10.1039/D2TC04039E](https://doi.org/10.1039/D2TC04039E)), пручаване су структурне, вибрационе и пиезоелектричне особине NaNbO<sub>3</sub> нановлакна орторомбичне структуре, синтетисаних коришћењем микроталасно потпомогнуте хидротермалне методе. Риетвалдова анализа рендгенског спектра је показала присуство и антифероелектричне (Pbcm) - АФЕ и фероелектричне (P2<sub>1</sub>ma) - ФЕ фазе на собној температури. Рамановом спектроскопијом су детаљно проучавани вибрациони модови NaNbO<sub>3</sub> нановлакна који припадају обема фазама. Моделовањем температурно-зависних Раманових спектре, утврђено је да се интензитети појединих вибрационих модова, који се могу приписати ФЕ или АФЕ фази, мењају са температуром. На основу промена интензитета ових модова је показано да повећање температуре фаворизује веће присуство ФЕ фазе у орторомбичној структури NaNbO<sub>3</sub>, мада обе фазе коезистирају при свим температурама. Анализа температурно-зависних Раманових спектра је омогућила боље дефинисање фазног прелаза у овом материјалу. Пиезоелектрична мерења (PFM) су потврдила ове резултате показавши да свака појединачна честица садржи регионе са фероелектричним и нефероелектричним карактеристикама. Теоријске DFT симулације су показале да се релативна стабилност између АФЕ и ФЕ фазе NaNbO<sub>3</sub> нановлакна може променити под утицајем електричног поља, зависно од оријентације поља у односу на влакна и да се прелаз из АФЕ у ФЕ фазу дешава при јачим електричним пољима него код NaNbO<sub>3</sub> прашкастих материјала и монокристала. Осим тога, теоријска DFT анализа је сугерисала да присутност фазе без фероелектричних особина, установљена PFM мерењима, може имати неке карактеристике антифероелектричне фазе. Кандидат је измерио и моделовао Раманове спектре на различитим температурама и дао доминантан допринос у анализи и дискусији резултата и писању рада.



У четвртој публикацији, ([doi.org/10.2298/PAC2002102D](https://doi.org/10.2298/PAC2002102D)), испитивао се утицај кобалта као допанта на структурне, електронске, оптичке и фотокаталитичке особине  $\text{SnO}_{2-\delta}$  нанокристала, синтетисаних микроталасно потпомогнутом хидротермалном методом. Коришћењем рендгенске дифракције, утврђено је да и недопиран ( $\text{SnO}_{2-\delta}$ ) и допирани ( $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ ,  $0 \leq x \leq 0.05$ ) узорци кристалишу у тетрагоналну рутилну структуру без примеса других фаза. Из Шереровог метода је добијено да су димензије  $\text{SnO}_{2-\delta}$  кристалита мање од Боровог ексцитонског радијуса за овај материјал, а да допирање кобалтом доводи до даљег смањења димензије кристалита у односу на недопиран узорак, што указује да кобалт има инхибиторски ефекат на раст  $\text{SnO}_{2-\delta}$  кристалита. Такође је установљено да код узорка са повећаним садржајем кобалта ( $\text{Sn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ ), кобалт улази у  $\text{SnO}_{2-\delta}$  решетку у стањима мешане валенце ( $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ ). UV-VIS апсорпциона мерења су показала да се најинтензивнија апсорпциона трака, која одговара прелазу из валентне у проводну зону код  $\text{SnO}_{2-\delta}$ , помера ка нижим таласним дужинама са допирањем, тј. долази до повећање енергетског процепа у  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наночестицама. У допираним узорцима са 3% и 5% Co, поред трака које одговарају стањима  $\text{Co}^{2+}$ , појављују се и нове траке које одговарају стањима  $\text{Co}^{3+}$  јона чија концентрација расте са допирањем. Ови резултати су у потпуној сагласности са резултатима рендгенске дифракције. Анализа Рамановог спектра недопираног  $\text{SnO}_{2-\delta}$  узорка је потврдила рутилну структуру, али и указала на постојање два нова мода: интензивног мода на око  $574 \text{ cm}^{-1}$  и новог мода на око  $430 \text{ cm}^{-1}$  који се иначе не јављају у монокристалним узорцима  $\text{SnO}_2$ . Ови модови се приписују појави кисеоничних ваканција у решетки  $\text{SnO}_{2-\delta}$ , које представљају најчешће дефекте у рутилној структури. Мод на око  $574 \text{ cm}^{-1}$  је тзв. in-plane мод кисеоничних ваканција ( $V_{\text{Oin}}$ ), док мод на око  $430 \text{ cm}^{-1}$  одговара формираним кластерима ваканција ( $V_{\text{C}}$ ). Моделовани спектри допираних  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  узорака су показали да интензитети вакантних модова опадају са допирањем, тј. да се смањује концентрације кисеоничних ваканција. Коришћењем фотолуминисценције, истраживани су типови кисеоничних дефеката у  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  наночестицама. Деконволуција фотолуминесцентних (ФЛ) спектра  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  нанопорова је потврдила постојање различитих типова дефеката, укључујући  $V_{\text{Oin}}$  и  $V_{\text{OSB}}$  ваканције, као и једноструко јонизоване кисеоничне ваканције (тзв.  $F^+$  дефекти), чија се стања налазе дубоко у енергетском процепу. Анализа и моделовање фотолуминесцентних спектра су омогућили да се предложи модел за релаксационе процесе у  $\text{SnO}_{2-\delta}$  наноматеријалима. Допирање кобалтом је довело до гашења луминесценције која потиче од дефеката што је у сагласности са закључцима изведеним из анализе Раманових спектра. Анализа комплексне диелектричне функције  $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  нанокристала, помоћу спектроскопске елипсометрије, је показала да сви узорци имају директан енергетски процеп и да са повећањем концентрације Co долази до помераја енергијског процепа ка вишим енергијама што је у сагласности са анализом UV-VIS апсорпционих спектра. Пораст вредности енергијског процепа је објашњен комбинованим ефектима квантног ограничења (смањење димензије кристалита са допирањем), и повећањем густине наелектрисања која доводи до помераја Фермијевог нивоа ка вишим енергијама и повећања енергетског процепа (тзв. Брнштајн-Мосов померај). Повећана густина наелектрисања потиче од присуства донорских дефеката у виду кисеоничних ваканција (недопиран  $\text{SnO}_{2-\delta}$ ) као и повећане



концентрације Со јона код допираних узорка. Недопирани  $\text{SnO}_{2-\delta}$  показује значајно бољу фотокаталитичку активност при разградњи азо боја под UV светлошћу у поређењу са допираним узорцима. Овакво понашање је објашњено бољом апсорпцијом UV светлости и повећаном концентрацијом кисеоничних ваканција, које формирају стања близу проводне (донорски нивои) или валентне зоне (акцепторски нивои) у зависности од типа дефекта. Ова стања заробљавају електроне или шупљине као носиоце наелектрисања и спречавају њихову брзу рекомбинацију, омогућавајући бржи транспорт наелектрисања ка површини наночестица и формирање радикала неопходних за разградњу азо боја. Кандидат је анализирао и објаснио UV-VIS апсорпционе спектре, учествовао је у мерењу спектра фотолуминесценције, анализирао је и моделовао ФЛ спектре, и дао доминантан допринос дискусији резултата и писању рада.

У петој публикацији, кандидатово предавање по позиву, „*Spin-phonon coupling in nanostructures revealed by Raman spectroscopy*“, представља важан допринос у разумевању суптилне интеракције између спинова и вибрација решетке (спин-фонон интеракције) у мултифероичним наноструктурама. Боље познавање механизма спин-фонон интеракције је од кључног значаја за манипулацију магнетним, фероелектричним и магнето-електричним особинама ових материјала. Коришћењем Раманове спектроскопије, кандидат је истраживао ефекте интеракције оптичких фонона и двофонона са различитим типовима магнетног уређења. Коришћењем теорије средњег поља и Хајзенберговог модела за опис интеракције између најближих суседних магнетних јона, успешно је објашњена атипична температурска зависност фреквенција одређених фононских и двофононских модова, што је омогућило да се из линеарне везе фреквенцијског помераја фонона са спинском корелационом функцијом квантитативно процени јачина спин-фонон интеракције за различите фононске и двофононске модове. Кандидат је доминантно допринео осмишљавању и извођењу експеримената, анализи и дискусији резултата и на тај начин значајно допринео унапређењу разумевања и објашњења комплексних механизма спин-фонон интеракција у мултифероичним наноматеријалима.

### **3.1.2. Позитивна цитираност научних радова кандидата**

Према SCOPUS бази на дан 31. октобра 2023. године, радови кандидата су цитирани укупно 415 пута, односно 404 пута без аутоцитата. Према истој бази, h- индекс кандидата је 11, односно 10 без аутоцитата (доказ у прилогу).

### **3.1.3. Параметри квалитета радова у часописима**

Битан елемент за процену квалитета научних резултата је и квалитет часописа у којима су радови објављени, односно њихов импакт фактор (ИФ). У категорији M21a, M21 и M22, кандидат је објавио радове у следећим часописима, где су подвучени они часописи (тј. одговарајући импакт фактори) у којима је кандидат објављивао у изборном периоду:

- 1 рад у Journal of Applied Physics (ИФ = 2.210),



- 6 рада у *Ceramics International* (ИФ = 2.758, 2.605, 2.758, 3.057, 3.057, 3.057),
- 1 рад у *Materials Characterization* (ИФ = 1.925),
- 1 рад у *Surface and Coatings Technology* (ИФ = 2.199),
- 1 рад у *Journal of Alloys and Compounds* (ИФ = 3.133),
- 2 рада у *Journal of Physics D: Applied Physics* (ИФ = 2.772, ИФ: 2.829),
- 1 рад у *Materials Research Bulletin* (ИФ = 2.435),
- 1 рад у *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (ИФ = 2.357),
- 1 рад у *Processing and Application of Ceramics* (ИФ = 1.152).
- 1 рад у *Scripta Materialia* (ИФ: 4.539)
- 1 рад у *Processing and Application of Ceramics* (ИФ: 1.330)
- 1 рад у *Materials Science and Engineering: B* (ИФ: 4.706)
- 1 рад у *Journal of Materials Chemistry C* (ИФ: 8.067)
- 1 рад у *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* (ИФ: 7.382)
- 1 рад у *Molecules* (ИФ: 4.927)

Сумарни импакт фактор радова кандидата је 69.255, а за изборни период сумарни импакт фактор је 33.780. Часописи у којима је кандидат објављивао свеукупно до сада су по свом угледу веома цењени и водећи у областима којима припадају. Међу њима се посебно издвајају: *Journal of Materials Chemistry C*, *Materials Science and Engineering: B*, *Ceramics International*, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, *Scripta Materialia*.

Додатни библиометријски показатељи квалитета часописа у којима је кандидат објављивао радове је дат у следећој табели, датој за М20 радове објављене након претходног избора у звање. Она садржи импакт факторе (ИФ) радова, М поене радова по српској категоризацији научноистраживачких резултата, као и импакт фактор нормализован по импакту цитирајућег чланка (СНИП). У табели су дате укупне вредности, као и вредности свих фактора усредњених по броју чланака и по броју аутора по чланку.

	ИФ	М	СНИП
Укупно	33.780	52	8.938
Усредњено по чланку	4.826	7.429	1.277
Усредњено по аутору	5.042	8.117	1.435

#### **3.1.4. Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству**

Др Бојан Стојадиновић је био самостално задужен за развој техника синтезе и карактеризације танких филмова и нанопрахова мултифероичних материјала у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику. Синтеза танких филмова на спин коутеру је техника коју је кандидат инсталирао и развио на Институту за физику. Др Стојадиновић је учествовао у обуци и инсталацији уређаја за мерења порозности материјала. Такође је учествовао у поставци експеримента за мерење импеданских и диелектричних особина материјала на високим температурама. Др Стојадиновић је имао неколико кратких посета Институту за физику у Франкфурту



и остварио успешну сарадњу са групом Проф. др Михаела Хута. Такође, кандидат самостално руководи радним задатком на билатералном пројекту Србије и Индије. Др Стојадиновић је значајно допринео сваком раду на којем је учествовао. У оквиру своје експертизе за синтезу наноматеријала одређених особина и испитивање структурних, оптичких, вибрационих, диелектричних, магнетних и морфолошких особина, учествовао је у осмишљавању проблематике, експерименталним мерењима обради и анализи експерименталних података, развијању модела и програма за анализу и тумачење резултата и писању радова.

### **3.1.5. Награде**

Др Бојан Стојадиновић је добитник награде Привредне коморе Србије за најбољу докторску дисертацију у 2018. години. Плакета награде је у прилогу. Добитник је стипендије Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка за период 2010-2013. године.

### **3.2. Ангажованост у формирању научних кадрова**

Др Бојан Стојадиновић је био коаутор експерименталних задатака за српску физичку олимпијаду 2018/19. године.

Др Бојан Стојадиновић је био у комисији за такмичење у научним радовима на Приматијадама у Балатону 2015. године и у Чању 2017. године.

Такође, учествовао је у програму Популаризација физике у периоду 2010/11. година и био је предавач из области математике током припрема ученика осмог разреда са територије града Београда за полагање завршног испита (докази у прилогу).

### **3.3. Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења**

Свих 7 радова кандидата објављених након претходног избора у звање припадају категорији експерименталних радова у природно математичким наукама, који често садрже већи број експерименталних техника и коаутора. Од ових радова, 5 радова има до 7 аутора и они се признају са пуним бројем бодова. 2 рада имају више од 7 аутора и они су нормирани у складу са правилником о нормирању броја коауторских радова. Укупан број бодова др Стојадиновића у изборном периоду пре нормирања износи 69, а након нормирања 65.5, што је изнад захтеваног броја бодова за избор у звање виши научни сарадник.

### **3.4. Руководјење пројектима, потпројектима и пројектним задацима**

Др Бојан Стојадиновић је 2017. године учествовао на пројекту *STSM (Short term scientific mission)* под називом: „*Ferroelectric properties of BiFeO<sub>3</sub> thin films as monitored by nano-granular sensor structures prepared by focused electron beam induced deposition*“ у сарадњи са Проф. др Михаелом Хутом са Института за физику, Универзитета у Франкфурту, Немачка (доказ у прилогу).

На пројекту ОИ171032 Министарства просвете, науке и технолошког развоја, који је трајао од 2011. до 2019. године, др Стојадиновић је руководио пројектним задатком који се односи на синтезу и испитивање мултифероичних особина нанооксидних материјала на бази бизмут ферита у периоду 2013-2019. године (доказ у прилогу).



На пројекту билатералне сарадње Србија-Индија у периоду 2022-2024. године, Министарства просвете, науке и технолошког развоја, под називом „Примена мултифероичних наноструктура на бази перовскита у заштити од електромагнетних сметњи (ЕМС) и фотоволтаичним (ФВ) апликацијама“ (451-02-697/2022-09/02), руководи радним задатком који се односи на синтезу бизмут ферита и композита, и испитивање њихових диелектричних и магнетних својстава (доказ у прилогу).

### **3.5. Активност у научним и научно-стручним друштвима**

Др Бојан Стојадиновић је био члан организационог одбора V, VI и VII међународне конференције Друштва за керамичке материјале Србије (доказ у прилогу). Рецензент је у међународним часописима *Journal of Raman Spectroscopy, Processing and Application of Ceramics* и *Surface & Coatings Technology* (докази у прилогу).

### **3.6. Утицај научних резултата**

Утицај научних резултата кандидата је наведен у одељку 3.1 овог документа. Пун списак радова је дат у одељку 5, а подаци о цитираности са странице Scopus базе су дати након списка свих радова.

### **3.7. Конкретан допринос кандидата у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству**

У радовима на којима је водећи или други аутор, кандидат је имао кључан допринос у осмишљавању проблематике и избору методологије, експерименталном делу рада, моделовању и анализи резултата. Радове на којима је први аутор је написао у целини, написао је значајан део неколико радова на којима је други аутор. У осталим радовима је дао значајан допринос у мерењу и/или моделовању добијених спектра, анализи резултата и писању тог дела истраживања.

У току боравка на Институту за физику у Франкфурту кандидат је дао допринос у развоју спин коутинг методе за синтезу танких филмова бизмут ферита, у којима је истраживан утицај промене фeroелектричне поларизације у непосредној близини наночестица платине које су уграђене помоћу FEBID методе. Резултати овог истраживања су представљени у опису STSM (*Short term scientific mission*) пројекта на коме је кандидат учествовао 2017. године. Експеримент је у целини изведен на Институту за физику у Франкфурту.

### **3.8. Уводна предавања на конференцијама, друга предавања и активности**

Др Бојан Стојадиновић је одржао предавање по позиву на 6. конференцији Друштва за керамичке материјале Србије, у Београду 2022. године (доказ у прилогу).



#### 4. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАНТИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

Остварени резултати у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M13	7	2	14	14
M21a	10	1	10	10
M21	8	4	32	29
M22	5	2	10	8.57
M32	1.5	2	3	3

Поређење са минималним квантитативним условима за избор у звање виши научни сарадник:

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено, број М бодова без нормирања	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	50	69	64.57
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90	40	69	64.57
M11+M12+M21+M22+M23	30	52	47.57

Према SCOPUS бази на дан 31. октобар 2023. године, сви радови кандидата су цитирани укупно 415 пута, а 404 без аутоцитата, док h-индекс износи 11, односно 10 без аутоцитата.



## 5. Закључак

Имајући у виду квалитет научноистраживачког рада кандидата представљеног у овом извештају, сматрамо да кандидат др Бојан Стојадиновић испуњава све квантитативне и квалитативне критеријуме за избор у научно звање виши научни сарадник предвиђене Правилником о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. На основу свега наведеног, изузетно нам је задовољство да предложимо Научном већу Института за физику да усвоји овај извештај и подржи избор др Бојана Стојадиновића у звање виши научни сарадник.

У Београду, 20.11.2023. године

Чланови комисије



др Зорана Дохчевић-Митровић  
научни саветник  
Институт за физику у Београду



др Новица Пауновић  
виши научни сарадник  
Институт за физику у Београду



др Растко Василић  
редовни професор  
Физички факултет у Београду