

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/72

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

12. 4. 2024.

(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације
и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

Унапређивање архитектуре соларних ћелија: улога неконвенционалних материјала

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

Јован (Небојша) Лукић

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Универзитет у Београду,

Технолошко-металуршки факултет, Мастер студије, Мастер инжењер технологије

3. Година завршетка
претходног нивоа студија: 2021.

4. Година уписа на докторске студије: 2021.
-

5. Назив студијског програма
докторских студија:

Инжењерство материјала

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ :

Име и презиме ментора: др Вук Радмиловић

Звање: ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Guo F., Li N., **Radmilovic V.V.**, Radmilovic V.R., Turbiez M., Spiecker E., Forberich K., Brabec C.J., *Fully printed organic tandem solar cells using solution-processed silver nanowires and opaque silver as charge collecting electrodes*, Energy and Environmental Science, Vol 8, 2015, pp. 1690-1697, ISSN 1754-5692, IF (2015) = 25,427, <https://doi.org/10.1039/C5EE00184>.
2. Guo F., Li N., Fecher F., Gasparini N., Ramirez Quiroz C.O., Bronnbauer C., Hou Y., **Radmilovic V.V.**, Radmilovic V.R., Spiecker E., Forberich K., Brabec C.J., *A generic concept to overcome bandgap limitations for designing highly efficient multi-junction photovoltaic cells*, Nature Communications, Vol 6, 2015, pp. 7730, ISSN 2041-1723, IF (2015) = 11,239, <http://doi.org/10.1038/ncomms8730>.
3. Goebelt M., Keding R., Schmitt S.W., Hoffmann B., Jaeckle S., Latzel M., **Radmilovic V.V.**, Radmilovic V.R., Spiecker E., Christiansen S., *Encapsulation of Silver Nanowire Networks by Atomic Layer Deposition for Indium-Free Transparent Electrode Applications*, Nano Energy, Vol 16, 2015, pp. 196-206, ISSN 2211-2855, IF (2015) = 11,553 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.06.027>.
4. Mijailovic D.M, **Radmilovic V.V.**, Lacnjevac U., Stojanovic D., Jovic V., Radmilovic V.R., Uskokovic P.S., *Core-shell carbon fiber@ Co_{1.5}Mn_{1.5}O₄ mesoporous spinel electrode for high performance symmetrical supercapacitors*, Applied Surface Science, Vol 534, 2020, pp. 147678, ISSN 0169-4332, IF (2020) = 6,707, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147678>.
5. Hou Y., Xie C., **Radmilovic V.V.**, Puscher B., Wu M., Heumueller T., Karl A., Li N., Tang X., Meng W., Chen S., Osvet A., Guldi D., Spiecker E., Radmilović V.R., Brabec C.J., *Assembling Mesoscale Structured Organic Interfaces in Perovskite Photovoltaics*, Advanced Materials Vol 31, 2019, pp. 1806516, ISSN 0935-9648, IF (2019) = 27,398, <https://doi.org/10.1002/adma.201806516>.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

- Прилог
1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
 2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

ДП

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 43. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 11.4.2024. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата
за израду докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобрава израда докторске дисертације **Јована Лукића**, број индекса 4022/21, под називом: **„Унапређивање архитектуре соларних ћелија: улога неконвенционалних материјала“**.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За ментора се одређује др Вук Радмиловић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Јована Лукића, мастер инжењера технологије, за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду бр. 35/38 од 14.03.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата ЈОВАНА ЛУКИЋА за израду докторске дисертације и научне заснованости теме

„Унапређивање архитектуре соларних хелија: улога неконвенционалних материјала“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Јован (Небојша) Лукић, мастер инжењер технологије, рођен је 24.1.1997. године у Крагујевцу. Завршио је основну школу „Станислав Сремчевић“, а потом и Прву Крагујевачку гимназију, у Крагујевцу. Основне студије на Технолошко-металуршком факултету у Београду, започео је 2016/2017. школске године, на смеру инжењерство материјала. Добитник је факултетске стипендије за изузетан постигнут успех током основних студија 2017/18. и 2018/19. школске године као и добитник стипендије министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије школске године 2019/2020. Основне студије завршио је са просеком 9,73 (9,73/10) са темом завршног рада „Одеђивање величине полазног аустенитног зрна у средњеугљеничном V-микролегираном челику“, који је одбрањен са оценом 10 под руководством ментора проф. др Ненада Радовића. Добитник је награде Српског хемијског друштва за изузетан успех током студија на Технолошко-металуршком факултету. Мастер академске студије уписује 2020/2021. године на смеру инжењерство материјала, где успешно брани мастер рад под менторством доц. др Вука Радмиловића под називом „Танки нанокмполитни филмови на бази полимера PANI и нано-жица сребра за примену у оптоелектроници“ са оценом 10 чиме стиче звање мастер инжењер материјала. Током мастер студија борави 2 месеца у Аустрији, Леобену на Катедри за структурну и функционалну керамику, где се бавио испитивањем механичких својстава функционалних керамичких материјала. Школске 2021/22. године уписује докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету, студијски програм Инжењерство материјала. У оквиру докторских студија положио је 12/12 испита предвиђене студијским програмом са просечном оценом 9,73 (9,73/10) и јуна 2023. године одбранио завршни испит на тему „Транспарентне електроде у перовскитним соларним хелијама“ са

оценом 10 пред комисијом у саставу проф. др Ђорђе Јанаћковић, проф. др Бранимир Гргур и доц. др Вук Радмиловић.

Јован Лукић је 10.03.2022. године изабран за истраживача приправника на Технолошко-металуршком факултету на Катедри графичко инжењерство.

Члан је организационог и техничког одбора међународне конференције „ELMINA“ као и техничког одбора међународне конференције „Yusomat“.

Кандидат је у својству демонстратора на предмету Обрада материјала штампањем, услед чињенице да је савладао технике 3D штампања модела које примењује и у другим активностима Катедре за графичко инжењерство (на бази целулозе, у примени за израду амбалажних материјала). Учествовао на изради неколико дипломских радова на катедри за Графичко инжењерство. Активан члан тима за промоцију Технолошко-металуршког факултета.

У табели 1. приказан је списак положених испита, са оценама и оствареним ЕСПБ бодовима.

Табела 1. Списак положених испита, са оценама и оствареним ЕСПБ бодовима

Редни бр.	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
1.	Карактеризација структуре материјала	10	5
2.	Одабрана поглавља инструменталне анализе	10	7
3.	Електрокерамика	10	4
4.	Електродни материјали	10	5
5.	Хемијски сензори	10	5
6.	Хемијска кинетика	7	5
7.	Електрохемијски и алтернативни извори електричне енергије	10	5
8.	Наука о материјалима и инжењерство материјала	10	6
9.	Термодинамика чврстог стања	10	5
10.	Одабрана поглавља математичке анализе	10	5
11.	Енглески језик	10	/
12.	Завршни испит	10	30
Просечна оцена / Укупно бодова		9,73	82

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Јован Лукић, истраживач – приправник Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, запослен на Катедри за графичко инжењерство бави се алтернативним материјалима који се користе у оквиру перовскитних фотонапонских система са циљем побољшавања и унапређења њихових карактеристика и оперативне стабилности кроз синтезу и карактеризацију материјала и уређаја.

У јулу 2022. године учествовао је на летњој школи на тему „International Summer School of Advanced Materials (ISS-AM) - Advanced Functional Materials“ коју организује универзитет Shanghai Jiao Tong University. Стипендиста Универзитета у Фрибургу, Швајцарска у оквиру института Адолф Меркле (Adolphe Merkle Institute), где се током тромесечног боравка септембар-децембар 2023. бавио синтезом и карактеризацијом материјала за фотонапонске уређаје.

Из досадашњих истраживања Јован Лукић објавио је три саопштења са међународних скупова из категорије (M34), док су два рада на рецензији у часописима категорије M21.

Рад саопштен на скупу међународног значаја штампан у изводу (M34):

1. **Jovan N. Lukić**, Vuk V. Radmilović, „*Thin Film Polyaniline/Silver Nanowires Nanocomposites for Optoelectronic Applications*”, 2nd International Conference ELMINA Electron Microscopy of Nanostructures, Belgrade, Serbia, August 22-26, 2022, Book of Abstracts, p. 186-187, ISBN: 978-86-7025-943-0
2. **Jovan N. Lukić**, Vuk V. Radmilović, „*Thin film nanocomposites based on polyaniline and silver nanowires for optoelectronic applications*”, Nineteenth Young Researchers Conference Materials Science and Engineering, December 1-3, 2021, Belgrade, Serbia, Book of Abstracts, p. 73, ISBN: 978-86-80321-36-3
3. **Jovan N. Lukić**, Vuk V. Radmilović, „*Stability of solution processed transparent electrodes*”, The twenty-fourth annual conference Yucomat 2023, September 4-8, 2023, Herceg Novi, Crna Gora, Book of Abstracts, p. 31, ISBN: 978-86-919111-8-8

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег научноистраживачког рада и постигнутих резултата током докторских академских студија Јован Лукић је показао способност и самосталност за бављење научноистраживачким радом, што се огледа у реализацији истраживања, тј. извођењу експеримената, обради научних резултата и писању научних радова и научноистраживачких пројеката. Из научне области којој припада тема предложене докторске дисертације кандидат је први аутор три саопштења са међународних скупова штампаних у изводу.

2. Предмет и циљ истраживања

Фотонапонске (*photovoltaic*, PV) ћелије представљају иновативан и савремен начин како би се необновљиви извори енергије заменили обновљивим. Коришћењем неисцрпне снаге сунчеве светлости, ови уређаји претварају сунчево зрачење у електричну енергију, нудећи одрживу и еколошки прихватљиву алтернативу традиционалним фосилним горивима. Тренутно, велика већина тржишта фотонапонских ћелија се састоји углавном од конвенционалних силицијумских (Si) ћелија на бази плоча, због њихових високих ефикасности конверзије, велике стабилности при оперативним условима и самој заступљености силицијума као материјала у земљиној кори. Међутим, производња Si фотонапонских уређаја троши значајну количину материјала, дајући као резултат велике тежине Si соларних панела. Као последица, укупни трошкови (материјали, производња и инсталација) за Si соларне панеле су високи.

Нове генерације соларних ћелија су се показале као алтернативна технологија, са потенцијално нижим ценама производње уз побољшане фотонапонске карактеристике, а где су највећи потенцијал показале перовскитне соларне ћелије (*perovskite solar cell* - PSC) са изузетним ефикасностима (26% за једнослојне соларне ћелије). Перовскитни материјали поседују јединствену кристалну структуру (формуле ABX_3) која омогућава ефикасну апсорпцију светлости и пренос носилаца наелектрисања, отварајући пут за њихову примену. Међу бројним структурама ових материјала који се могу применити као фотонапонске ћелије, хибридни халогени перовскити су се показали као потенцијална алтернатива, услед њихових изузетних фотонапонских карактеристика. Ови материјали се састоје како из неорганских тако и органских делова, где А представља централни органски катјон (метиламонијум MA), (формадинијум FA) или неоргански (цезијум Cs), катјон В је обично

олово (Pb^{2+}) или калај (Sn^{2+}) и анјон X представљају халогени елементи (I, Br или Cl). Оваква структура перовскита омогућава њихова одлична фотонапонска и оптоелектронска својства. Како би се постигла функционална перовскитна соларна ћелија, потребно је пажљиво направити слојевиту структуру, где ће сваки слој имати специфичну сврху унутар уређаја. Пример једне вишеслојне архитектуре чини 1) транспарентна електрода, 2) слој за транспорт електрона, 3) перовскитни активни слој, 4) слој за транспорт шупљина и 5) контактна електрода. Иако овако конструисана архитектура може досећи високе ефикасности, значајни проблеми за примену ових уређаја представљају њихове нестабилности услед присуства атмосферских утицаја (кисеоника и повећане влажности ваздуха) и нестабилности током оперативних услова (функционисање при радном напону, деградација услед дужег времена озрачивања). Један од разлога за ове нестабилности поред средине у којој се налазе уређаји, јесте присуство кретања јона приликом рада перовскитних соларних ћелија. Досадашњи начини да се превазиђу или успоре ефекти деградације су били кроз међуповршинско инжењерство, морфологију самих слојева и одабиром материјала за саме фотонапонске уређаје. Међутим до сада коришћени слојеви су показали стагнацију у погледу достизања потребних стабилности.

Као ефективна стратегија да се успори деградација перовскитних соларних ћелија, до сада коришћење структурног, међуповршинског инжењерства и самог конструисања уређаја је довело до побољшања оперативне стабилности. Конкретно, нековалентне везе су коришћене да се побољша стабилност фотонапонских уређаја као последица побољшања својстава самих перовскитних материјала кроз међуповршинско инжењерство. Као један од примера оваквог приступа халогено везивање се скоро применило у оквиру халогених перовскита, где се услед самих карактеристика халогене везе побољшава кристална оријентација¹, пренос наелектрисања на међуповршинама, фотонапонских карактеристика и оперативне стабилности перовскитних уређаја.

Као кључни део истраживања ове докторске дисертације користиће се алтернативни приступи за замену конвенционалних слојева у оквиру перовскитних соларних ћелија ради повећања њихове оперативне стабилности. Замена транспарентне електроде и слојева за пренос носиоца наелектрисања ће показати потенцијал примене алтернативних материјала у перовскитним уређајима. Поред овога на структуру перовскитних соларних ћелија ће се применити принцип нековалентног везивања, ради унапређења отпорности уређаја на утицаје атмосферских услова и друге факторе који утичу на стабилност. Акценат се ставља на утицају неконвенционалних материјала у оквиру архитектуре соларних ћелија чиме се омогућују побољшана стабилност и фотонапонска својства. Истраживања се заснивају на:

- Синтези појединачних материјала који се користе за слојеве у перовскитним соларним ћелијама са акцентом на неконвенцијалне материјале
- Утврђивању својстава појединачних слојева алтернативних материјала кроз структурне и оптоелектронске методе карактеризације.
- Конструкција функционалних перовскитних материјала коришћењем синтетисаних материјала
- Испитивању структурних, оптоелектронских, фотонапонских и стабилностних карактеристика уређаја на бази алтернативних материјала
- Одређивање и упоређивање међуповршинских и фотонапонских карактеристика побољшаних перовскитних соларних ћелија халогеним везивањем.
- Одређивању утицаја ових материјала на саму структуру, својства и карактеристике перовскитних соларних ћелија са акцентом на стабилност.

Ова истраживања би требало да допринесу бољем разумевању утицаја алтернативних, неконвенционалних, материјала и приступа на структурна, међуповршинска, оптоелектронска и фотонапонска својства. Резултати добијену у овој дисертацији би допринели унапређивању оперативне стабилности перовскитних соларних ћелија и даљем сагледавању корисности алтернативних материјала у оваквим структурама. Релевантна библиографија која представља основу за истраживања и експерименте за израду ове докторске дисертације:

1. Jena, A.K.; Kulkarni, A.; Miyasaka, T. *Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects*. Chem. Rev. Vol 119, 2019, pp. 3036–3103.
2. Milić, J.V.; Zakeeruddin, S.M.; Grätzel, M. *Layered Hybrid Formamidinium Lead Iodide Perovskites: Challenges and Opportunities*. Acc. Chem. Res., Vol 54, 2021, pp. 2729–2740.
3. Zhu, H.; Liu, Y.; Eickemeyer, F.T.; Pan, L.; Ren, D.; Ruiz-Preciado, M.A.; Carlsen, B.; Yang, B.; Dong, X.; Wang, Z.; et al. *Tailored Amphiphilic Molecular Mitigators for Stable Perovskite Solar Cells with 23.5% Efficiency*. Advanced Materials, Vol 32, 2020, pp. 1907757.
4. Milić, J.V. *Multifunctional Layered Hybrid Perovskites*. J. Mater. Chem. C, Vol 9, 2021, pp. 11428–11443.
5. Roy, P.; Kumar Sinha, N.; Tiwari, S.; Khare, A. *A Review on Perovskite Solar Cells: Evolution of Architecture, Fabrication Techniques, Commercialization Issues and Status*. Solar Energy, Vol 198, 2020, pp. 665–688.
6. Mingorance, A.; Xie, H.; Kim, H.; Wang, Z.; Balsells, M.; Morales-Melgares, A.; Domingo, N.; Kazuteru, N.; Tress, W.; Fraxedas, J.; et al. *Interfacial Engineering of Metal Oxides for Highly Stable Halide Perovskite Solar Cells*. Adv. Mater. Interfaces, Vol 5, 2018, pp. 1800367.
7. Luo, W.; AlSabeih, G.; Milić, J.V. *Supramolecular Control in Hybrid Perovskite Photovoltaics*. In Photochemistry; Crespi, S., Protti, S., Eds.; The Royal Society of Chemistry, 2022; pp. 346–370 ISBN 978-1-83916-567-2.
8. Metrangolo, P.; Canil, L.; Abate, A.; Terraneo, G.; Cavallo, G. *Halogen Bonding in Perovskite Solar Cells: A New Tool for Improving Solar Energy Conversion*. Angew Chem Int Ed, Vol 61, 2022, pp. e202114793.
9. Ball, M.L.; Milić, J.V.; Loo, Y.-L. *The Emerging Role of Halogen Bonding in Hybrid Perovskite Photovoltaics*. Chem. Mater. Vol 34, 2022, pp. 2495–2502.
10. Saccone, M.; Catalano, L. *Halogen Bonding beyond Crystals in Materials Science*. J. Phys. Chem. B, Vol 123, 2019, pp. 9281–9290.
11. Khan, A.; Nguyen, V.H.; Muñoz-Rojas, D.; Aghazadehchors, S.; Jiménez, C.; Nguyen, N.D.; Bellet, D. *Stability Enhancement of Silver Nanowire Networks with Conformal ZnO Coatings Deposited by Atmospheric Pressure Spatial Atomic Layer Deposition*. ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol 10, 2018, pp. 19208–19217.
12. Lagrange, M.; Langley, D.P.; Giusti, G.; Jiménez, C.; Bréchet, Y.; Bellet, D. *Optimization of Silver Nanowire-Based Transparent Electrodes: Effects of Density, Size and Thermal Annealing*. Nanoscale Vol 7, 2015, pp. 17410–17423.
13. Zhao, X.; Li, M.; Jiang, L.; Tang, H.; Guan, Y. *Preparation of Device-Level ZnO-Covered Silver Nanowires Films and Their Applications as Sub-Electrode for Polymer Solar Cells*. Front. Chem. Vol 9, 2021, pp. 683728,
14. Chu, S.B.; Ko, D.; Jung, J.; Jo, S.; Hyun, D.C.; Oh, H.-J.; Kim, J. *Characterization of Silver Nanowire-Based Transparent Electrodes Obtained Using Different Drying Methods*. Nanomaterials, Vol 12, 2022, pp. 461

15. Manning, H.G.; Niosi, F.; Da Rocha, C.G.; Bellew, A.T.; O'Callaghan, C.; Biswas, S.; Flowers, P.F.; Wiley, B.J.; Holmes, J.D.; Ferreira, M.S.; et al. *Emergence of Winner-Takes-All Connectivity Paths in Random Nanowire Networks.*, Nat Commun. Vol 9, 2018, pp. 3219.
16. Koo, S.; Park, J.; Koo, S.; Kim, K. *Local Heat Dissipation of Ag Nanowire Networks Examined with Scanning Thermal Microscopy.* J. Phys. Chem. C, Vol 125, 2021, pp. 6306–6312
17. Futscher, M.H.; Milić, J.V. *Mixed Conductivity of Hybrid Halide Perovskites: Emerging Opportunities and Challenges.* Front. Energy Res. Vol 9, 2021, pp. 629074.
18. Baranowski, M.; Urban, J.M.; Zhang, N.; Surrente, A.; Maude, D.K.; Andaji-Garmaroudi, Z.; Stranks, S.D.; Plochocka, P. *Static and Dynamic Disorder in Triple-Cation Hybrid Perovskites.* J. Phys. Chem. C., Vol 122, 2018, pp. 17473–17480.
19. Nguyen, V.H.; Resende, J.; Papanastasiou, D.T.; Fontanals, N.; Jiménez, C.; Muñoz-Rojas, D.; Bellet, D. *Low-Cost Fabrication of Flexible Transparent Electrodes Based on Al Doped ZnO and Silver Nanowire Nanocomposites: Impact of the Network Density.* Nanoscale, Vol 11, 2019, pp. 12097–12107.
20. Ochoa-Martinez, E.; Milić, J.V. *Get Tougher.* Nat Energy, Vol 6, 2021, pp. 858–859.
21. Roesch, R.; Faber, T.; Von Hauff, E.; Brown, T.M.; Lira-Cantu, M.; Hoppe, H. *Procedures and Practices for Evaluating Thin-Film Solar Cell Stability,* Advanced Energy Materials, Vol 5, 2015, pp. 1501407.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе које се могу издвојити као основа за научноистраживачки рад и које су проистекле из анализирања релевантне литературе у оквиру ове докторске дисертације су следеће:

- Високо ефикасне архитектуре (n-i-p типа, где се електрони прикупљају путем транспарентне електроде, а шупљине путем контактне електроде) перовскитних соларних ћелија су углавном базиране на структури која садржи транспаренту электроду попут калај оксида допираног флуором (FTO) или индијумом (ITO), слој за транспорт електрона (*electron transfer material* - ETM, најчешће се користи TiO₂), перовскитни слој, слоја за транспорт шупљина (*hole transporting material* - HTM) попут 2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-metoksifenil)amino]-9,9'-spirobifluoren (Spiro-OMeTAD). Услед природе перовскитног материјала као и међуслојне архитектуре ћелије, долази до значајне рекомбинације носиоца наелектрисања на међуповршинама слојева услед присутних дефаката у самим материјалима. Како би се омогућила боља својства преноса наелектрисања, а финално и боља фотонапонска својства потребно је пасивирати дефекте на међуповршинама слојева за транспорт наелектрисања и перовскита. У последњих пар година се у ову сврху примењује неконвенционални приступ халогених веза, где кроз додавање органских молекула се пасивирају дефекти на међуповршинама, чиме се побољшава и сам пренос наелектрисања.
- Транспарентне електроде које се најчешће користе у перовскитним соларним ћелијама су на бази ITO и самим тим захтевају високе цене производње услед потребе коришћења високих температура процесирања, коришћења крких неорганских структура, ретког елемента као што је индијум као и ниских вредности трансмисије у ултраљубичастом делу спектра због чега и потреба за алтернативама. Како би се заобишли проблеми који произилазе из ограниченог потенцијала ITO, металне наножице сребра (AgNW) поседују високу флексибилност, високу оптичку трансмисију и

одличну електричну проводљивост. Велики однос дужине и пречника омогућава високе вредности оптоелектронских својстава и одличну флексибилност материјала. Међутим висока површинска храпавост, слаба адхезија и велика склоност ка деградацији услед атмосферских и радних услова захтевају да се овакве структуре модификују кроз разне врсте композитних комбинација. Нанокompозит који је показао потенцијал за примену као транспарентна електрода на бази нано-жица сребра јесте AgNW/ZnO, где цинк оксид омогућује потребну заштиту за сребрне нано-жице без великог утицаја на електрична и оптичка својства.

- Дифузија побуђених носиоца наелектрисања и ефикасност њиховог проласка на међуповршинама су једни од кључних параметара који утичу на ефикасност PSC. Приликом кретања носиоца наелектрисања потребно је да слој за пренос електрона има довољну проводљивост како би дошло до успешног прикупљања наелектрисања. Конвенционални ЕТМ који се заснивају на TiO_2 , имају склоност да великим делом доприносе ка рекомбинацији надолazeћег наелектрисања услед присуства бројних дефеката на површини. Као потенцијално решење, цинк оксид са сличним енергијским нивоима валентне и проводне зоне као TiO_2 , као и већом мобилношћу електрона заједно са одличном транспарентношћу и ниским температурама на којима кристалише, чине да цинк оксид буде потенцијална замена као ЕТМ.
- До сада слој за пренос шупљина са којим су добијене највише ефикасности перовскитних соларних ћелија јесте Spiro-OMeTAD, често остваривши висок степен поновљивости. Са друге стране Spiro-OMeTAD као органски мали молекул има ниску покретљивост шупљина, што потиче од неполарног и аморфног стања које ограничава екстракцију шупљина. Повећање мобилности наелектрисања се побољшава допирањем и хемијску оксидацију. Међутим допирање не доприноси побољшању стабилности ових материјала од чега зависи и сама стабилност фотонапонских уређаја. Могуће је користити алтернативне материјале попут метализованих фталоцијанида који показују повећану стабилност при атмосферским условима.

Детаљан преглед литературе потврђује да су приказане полазне хипотезе и планирано истраживање у складу са глобалним активностима и интересовањима у науци.

4. Научне методе истраживања

Да би се реализовали циљеви истраживања ове докторске дисертације и потврдиле постављене хипотезе користиће се следеће методе:

- Синтеза слоја за транспорт наелектрисања у оквиру соларних ћелија ће бити урађена из течности сол-гел методом.
- Добијање танких нанокompозитних филмова биће урађено из течности методом ротирајућег диска и спреј пиролизе
- Мерење електричних својстава нанокompозитних филмова вршиће се методом четири тачке.
- Структурна својства ће бити испитана рендгенском дифракцијом филмова
- Испитивање оптичких својстава, односно провидности, апсорпције филмова ће бити вршена на UV-Vis спектрофотометру
- Морфолошка својства, попречни пресеци перовскитних соларних ћелија ће бити испитана скенирајућом електронском микроскопијом, а расподела елемената анализираће се енерго-дисепрзионом спектроскопијом X зрачења (EDS)
- Попречни пресек нанофилмова ће бити испитани путем високо резолуционе

трансмисионе микроскопије као и испитивање граничних површина насталих у току процесу термичке обраде филмова.

- Површина слојева третираних халогеним везивањем ће бити испитана микроскопијом атомских сила као и испитивање електричних потенцијала површине и радне функције (Kelvin probe force microscopy KPFM).
- Енергијски нивои халогено везаних слојева биће испитани ренгенском фотоелектронском спектроскопијом (XPS) у комбинацији са ултраљубичастом фотоелектронском спектроскопијом (UPS) за одређивање зонског дијаграма.
- Оперативна стабилност соларних ћелија ће бити испитана помоћу праћења тачака максималне снаге (maximum power point - MPP) у константној атмосфери азота.
- Фотонапонске карактеристике перовскитних соларних ћелија ће бити добијена кроз праћење струјно напонских карактеристика уз симулирано осветљење од 1000W/m^2 .

5. Очекивани научни допринос

Реализацијом циљева истраживања ове докторске дисертације очекује се да ће се остварити напредак у области фотонапонских перовскитних соларних ћелија, њихове стабилности и фотонапонских карактеристика. Очекивани научни допринос резултата ове докторске дисертације се огледа у следећем:

- Оптимизација услова наношења танких превлака на бази нанокомпозита нано-жица сребра и цинк оксида
- Унапређивање морфолошких, електричних и оптичких својстава нанокомпозита нано-жица сребра и цинк оксида
- Побољшање електричне стабилности нанокомпозита нано-жица сребра и цинк оксида
- Синтеза и оптимизација услова синтезе из течности наночестица цинк оксида
- Оптимизација морфолошких, структурних и оптичких својстава наночестица цинк оксида
- Синтеза и добијање функционалних перовскитних соларних ћелија побољшаних стабилности алтернативних приступа попут халогеног везивања.
- Побољшање стабилности и фотонапонских својстава наночестичног цинк оксидног слоја за транспорт електрона у оквиру соларне ћелије
- Унапређење стабилности и преноса носиоца наелектрисања перовскитних соларних ћелија помоћу халогеног везивања
- Оптимизација перовскитних соларних ћелија кроз модификацију вредности енергија зона појединачних слојева

6. План истраживања и структура рада

Предмет рада ове докторске дисертације јесте синтеза, карактеризација и утврђивање утицаја алтернативних материјала у оквиру слојевитих перовскитних фотонапонских уређаја. Синтезом појединачних слојева као и самом конструкцијом соларних ћелија и на основу карактеризације међуповршина као и самих материјала ће бити утврђен утицај и побољшање у оквиру једног перовскитног фотонапонског система базираног на алтернативним материјалима. Коришћењем принципа халогеног везивања на међуповршинама слојева за транспорт перовскитних соларних ћелија ће се побољшати

пренос наелектрисања, фотонапонске карактеристике и оперативна стабилност. Заменом слојева за транспорт наелектрисања ће се утврдити утицај и потенцијал ових алтернативних материјала као могуће замене за конвенционалне приступе у перовскитним соларним ћелијама.

Докторска дисертација ће обухватити следећа поглавља: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и литература.*

У поглављу *Увод* биће дефинисани циљеви дисертације, предмет истраживања, очекивани научни допринос дисертације, а такође ће бити размотрена актуелна научна истраживања. Укратко ће бити размотрена проблематика нестабилности перовскитних соларних ћелија и акцента на примени алтернативних приступа и материјала ка унапређивању како својстава тако и оперативне стабилности ових уређаја.

У оквиру *Теоријског дела* докторске дисертације биће обухваћен преглед досадашње литературе која поставља дата истраживања у перспективу, конкретно потребом за развојем фотонапонских система на бази перовскитних материјала. У овом делу ће се објаснити феномени транспарентних електрода, слојева за транспорт наелектрисања и физичких феномена везаних за соларне ћелије нових генерација. Акценат ће бити на стабилности појединачних слојева и на крају самих уређаја конструисаних који садрже појединачне слојеве.

У *Експерименталном делу* биће приказани подаци коришћених материјала и метода за синтезу и карактеризацију синтетисаних и конструисаних фотонапонских система. Где би се овај део поделио прво на део везан за транспарентну электроду, слој за пренос наелектрисања и на крају део везан за конструкцију перовскитних соларних ћелија и халогено везивање.

У поглављу *Резултати* приказани, појашњени и размотрени ће бити експериментално добијени резултати за појединачне материјали а тако и слојевиту структуру перовскитне соларне ћелије коришћењем различитих алтернативних материјала.

У поглављу *Дискусија* биће дискутовани структурни, морфолошки, оптоелектронски и фотонапонски резултати добијени различитим методама карактеризације кључним за схватање примењених материјала и феномена у оквиру једног вишеслојног система, у контексту публикованих резултата у литератури.

Поглавље *Закључак* ће објединити и сумирати кључне резултате ове докторске дисертације уз осврт на потенцијал и примену оваквих система.

У поглављу *Литература* биће наведене све референце које су цитиране у овој докторској дисертацији као и радови који су настали у току истраживања и рада на овој докторској дисертацији.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног Комисија сматра да је тема докторске дисертације Јована Лукића, мастер инжењера технологије, под насловом „**Унапређивање архитектуре соларних ћелија: улога неконвенционалних материјала**“ научно заснована и добро утемељена и да Јован Лукић испуњава све услове за рад на предложеној теми докторске дисертације. Резултати предложене докторске дисертације могу бити од велике важности за област фотонапонских система на бази перовскитних соларних ћелија њиховог унапређења путем употребе неконвенционалних материјала. Комисија сматра да ће резултати истраживања дати значајан допринос научној области Технолошко инжењерство (ужа научна област: Инжењерство материјала) за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да кандидату Јовану Лукићу одобри израду докторске дисертације под наведеним насловом. За ментора докторске дисертације Комисија предлаже др Вука Радмиловића, ванредног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 04. 04. 2024. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Вук Радмиловић, ванредни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Бранимир Гргур, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Милутин Ивановић, научни сарадник
Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд