

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета" број 131/06),
дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата

ВУКА (Велимир) РАДМИЛОВИЋА, дипломираног инж. технологије

КАНДИДАТ: **ВУК (Велимир) РАДМИЛОВИЋ, дипломирани инж. технологије,**

пријавио је докторску дисертацију под називом:

**„Транспарентни нанокомполитни филмови за примену у пластичној електроници
(Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications)“**

Из научне области: **ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

Универзитет је дана **08.02.2016.** године, својим актом **02 број: 61206-521/2-16,** дао
сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**„Транспарентни нанокомполитни филмови за примену у пластичној електроници
(Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications)“**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата:

ВУКА (Велимир) РАДМИЛОВИЋА, дипломираног инж. технологије

(име, име једног од родитеља и презиме)

образована је на седници одржаној **23.06.2016.** године Одлуком Факултета под бр. **35/348** у
саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1. Др Петар Ускоковић	Редовни професор	Инжењерство материјала
2. Др Ђорђе Јанаћковић	Редовни професор	Инжењерство неорганских хемијских производа
3. Др Весна Радојевић	Редовни професор	Инжењерство материјала
4. Академик др Зоран Поповић	Научни саветник	Инжењерство материјала
5. Др Erdmann Spiecker	Редовни професор	Инжењерство материјала

На захтев студента, а уз сагласност ментора, декан Факултета донео је Одлуку бр. 20/152 од 06.10.2016.
године о продужењу рока за завршетак студија за два семестра шк. 2016/2017. године.

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске
дисертације на седници одржаној дана **29.09.2016.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

На основу чл. 30. став 3. Закона о високом образовању, чл. 40. Статута ТМФ и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 29.09.2016. године, донета је

ОДЛУКА

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Академик др Зоран Поповић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за физику, Београд, др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Весна Радојевић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Erdmann Spiecker, редовни професор Универзитета Ерланген-Нирнберг, Немачка, Институт за микро и наноструктурна истраживања, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Транспарентни нанокомпозитни филмови за примену у пластичној електроници (Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications)”** коју је поднео **ВУК РАДМИЛОВИЋ**, дипл. инж. технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Вука Радмиловића под називом **„Транспарентни нанокомпозитни филмови за примену у пластичној електроници (Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications)”** Одлуком 02 број: 61206-521/2-16 од 08.02.2016. године.

Верификација научних доприноса:

Kategorija M 21a:

1. Guo F., Li N., **Radmilović V. V.**, Radmilović V. V., 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 & Environmental Science*, Volume 8, pp. 1690-1697, 2015 (IF 25.427) (ISSN: 1754-5706)
2. Guo F., Li N., Fecher F., Gasparini N., Quiroz C. O. R., Bronnbauer C., Hou Y., **Radmilović V. V.**, Radmilović 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*, Volume 6, Article No. 7730, 2015 (IF 11.329) (ISSN: 2041-1723)
3. Göbelt M., Keding R., Schmitt S. W., Hoffmann B., Jäckle S., Latzel M., **Radmilović 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*, Volume 16, pp. 196-206, 2015 (IF 11.553) (ISSN: 2211-2855)

Kategorija M 21:

1. **Radmilović V.V.**, Kacher J., Ivanović E.R., Minor A.M., Radmilović V.R., Multiple Twinning and Stacking Faults in Silver Dendrites, *Crystal Growth & Design*. Volume 16, pp. 467-474, 2016 (IF 4.425) (ISSN: 1528-7483)

Kategorija M 22:

1. **Radmilović V.V.**, Carraro C., Uskoković P.S., Radmilović V.R., Structure and Properties of Polymer Nanocomposite Films with Carbon Nanotubes and Graphene, *Polymer Composites*, DOI: 10.1002/pc.24079, 2016 (IF 2.004) (ISSN 1548-0569)

Kategorija M 34:

1. **Radmilović V.V.**, Stojanović D., Uskoković P.S., Aleksić R., Radmilović V.R., "Structure and properties of polyvinyl butyral based nanocomposites", *Fifteenth Annual Conference YUCOMAT 2013*, Herceg Novi, Montenegro, 2013, Book of Abstracts p.114, ISSN: 978-86-80321-18-9.

2. **Radmilović V.V.**, Carraro C., Uskoković P.S., Aleksić R., Radmilović V.R., "Raman Spectroscopy and electron microscopy of polymer based nanocomposites with carbon nanotubes and graphene", *Sixteenth Annual Conference Yucomat 2014*, Herceg Novi, Montenegro, 2014, Book of Abstracts p. 92, ISSN: 978-86-80321-18-9.

3. **Radmilović V.V.**, Göbelt M., Christiansen S., Spiecker E., Radmilovic V.R., "Silver Nanowire Based Networks for Transparent Electrode Applications", *Seventeenth Annual Conference Yucomat 2015*, Herceg Novi, Montenegro, 2015, Book of Abstracts p. 17, ISSN: 978-86-80321-18-9.

4. **Radmilović V.V.**, "Silver Nanowires as electrodes in solar cells", *The 14th Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering*, Belgrade, Serbia, 2015, Book of Abstracts p. 19, ISBN: 978-86-80321-26-4.

5. **Radmilović V.V.**, Göbelt M., Christiansen S., Spiecker E., Radmilović V.R., "Ag/ZnO Core/Shell Nanowires for Solar Cell Applications", *Junior Euromat 2016*, Lausanne, Switzerland, 2016, Book of Abstracts p. 65. ISBN 978-2-8399-1926-5.

6. **Radmilović V.V.**, Guo F., Brabec C.J., Spiecker E., Radmilović V.R., "Structural characterization of organic bulk heterojunction solar cells", *Eighteenth Annual Conference Yucomat 2016*, Herceg Novi, Montenegro, 2016, Book of Abstracts p.19. ISBN: 978-86-919111-1-9.

Докторска дисертација и Реферат о оцени докторске дисертације достављају се на увид јавности, а по истеку рока од 30 дана, на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Vuka V. Radmilovića

Odlukom br. 35/348 od 23.6.2016. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Vuka V. Radmilovića pod naslovom

„Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici”

"Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications"

Posle detaljnog pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- 14.10. 2010. Vuk V. Radmilović, dipl. inž. tehnologije, upisuje doktorske studije na Katedri za Inženjerstvo materijala Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, pod mentorstvom prof. dr Petra Uskokovića.
- 19.02.2015. Vuk V. Radmilović je Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta predložio temu za izradu doktorske disertacije pod nazivom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“. Za mentora je imenovan prof. dr Petar Uskoković.
- 26.02.2015. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, odlukom br. 35/78, imenovana je Komisija za ocenu podobnosti teme „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“ i kandidata za izradu doktorske disertacije.
- 28.01.2016. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, odlukom br. 35/10, usvojen je izveštaj Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata za izradu doktorske disertacije.
- 08.02.2015. Odlukom br. 61206-521/2-16 Veće naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu daje saglasnost na predlog teme kandidata Vuka V. Radmilovića pod nazivom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“.
- 23.06.2016. Odlukom br. 35/348 na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta imenuje se Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije Vuk V. Radmilović, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“.
- 25.08.2015. Odobren je zahtev Vuka V. Radmilovića za produženje roka završetka doktorskih studija za još dva semestra - do 30.09.2017. godine.

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala za koju je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu matična ustanova. Mentor je prof. dr Petar Uskoković, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta, koji je na osnovu dosadašnjih objavljenih radova i iskustava kompetentan da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Vuk Radmilović je rođen 19.11.1984. godine u Beogradu . Na Tehnološko -metalurškom fakultetu diplomirao je sa temom „*Termo-mehanička svojstva nanokompozitnih materijala polimetil metakrilat – grafin*” kod mentora prof. dr Petra Uskokovića . Školske 2010/11. upisao se na doktorske studije na Tehnološko -metalurškom fakultetu , studijski program Inženjerstvo materijala, pod rukovodstvom mentora prof. dr Petra Uskokovića . U okviru doktorskih studija položio je 11/11 ispita predviđenih studijskim programom sa prosečnom ocenom 9.92 i juna 2012. godine odbranio je završni ispit pod nazivom „ *Organski fotovoltaići na bazi heterospoja polimer : fuleren*“ sa ocenom 10, pred komisijom u sastavu prof. dr Petar Uskoković, prof. dr Radoslav Aleksić i dr Dušica Stojanović.

Od februara 2011. godine zaposlen je u Inovacionom centru Tehnološko-metalurškog fakulteta. Angažovan je sa 12 istraživačkih meseci na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom „Sinteza, razvoj tehnologija dobijanja i primena nanostrukturnih multifunkcionalnih materijala definisanih svojstava“, sa evidencionim brojem III 45019. U zvanje istraživač pripravnik izabran je maja 2011. godine, dok je u zvanje istraživač saradnik izabran oktobra 2014.

U periodu maj 2012 – jun 2012. boravio je na Katedri za civilno inženjerstvo i inženjerstvo zaštite životne sredine u Terniju , pri Univerzitetu u Perudi , Italiji (Università di Perugia , Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, INSTM, UdR Perugia, Terni), gde se bavio procesiranjem i karakterizacijom solarnih ćelija. U periodu oktobar 2014 – decembar 2014. boravio je u Centru za nanoanalizu i elektronsku mikroskopiju u Erlangenu, na Univerzitetu Fridrih Aleksandar Erlangen-Nirnbeg, Nemačka (CENEM-Center for Nanoanalysis and Electron Microscopy, Friedrich Alexander University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany) gde se bavio karakterizacijom nanokompozita za primenu u optoelektronici, u grupi profesora Erdmana Spikera (Erdmann Spiecker) i u Centru za materijale za elektroniku i energetske tehnologije (IMEET - Materials for Electronics and Energy Technologies), gde se bavio procesiranjem solarnih ćelija, u grupi profesora Kristofa Brabeca (Christoph Brabec). U februaru 2016. godine, kao stipendista Francuskog instituta u Srbiji (Institut français de Serbie), boravio je u Centru za materijale pri pariškom tehničkom univerzitetu, Korbej-Eson, Francuska (École Nationale Supérieure des Mines de Paris - MINES ParisTech, Centre des Matériaux of MINES ParisTech, Corbeil-Essones, France) gde se bavio karakterizacijom nanokompozita za primenu u optoelektronici u grupi profesora Alana Torela (Alain Thorel).

Društvo za istraživanje materijala Srbije je poster prezentaciju Vuka V. Radmilovića "Structure and properties of polyvinyl butyral based nanocomposites" proglasilo najboljom na međunarodnoj konferenciji YUCOMAT 2013, održanoj 2013. godine u Herceg Novom, Crna Gora. Društvo za istraživanje materijala Srbije je oralnu prezentaciju Vuka V. Radmilovića "Silver Nanowire Based Networks for Transparent Electrode Applications" proglasilo najboljom na međunarodnoj konferenciji YUCOMAT 2015, održanoj 2015. godine u Herceg Novom, Crna Gora (za istraživače do 35. godina starosti).

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija Vuka V. Radmilovića pod nazivom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“ napisana je na 214 strana, u okviru kojih se nalazi 6 poglavlja, 122 slika, 10 tabela i 533 literaturnih referenci. Doktorska disertacija sadrži poglavlja: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati, Diskusija, Zaključak i dalji plan rada. Literaturne reference su date na kraju svakog poglavlja. Disertacija je pisana na engleskom jeziku. Po formi i sadržaju, napisana disertacija zadovoljava sve standarde Univerziteta u Beogradu za doktorsku disertaciju.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U Uvodu je opisan globalni energetska problem osvrćući se na prednosti obnovljivih izvora energije u odnosu na konvencionalne, neobnovljive izvore energije. Izložene su karakteristike i prednosti solarne tehnologije koja se bazira na sunčevoj svetlosti, izvoru energije koji je praktično neograničen a pri tom nije štetan po životnu sredinu. U nastavku, objašnjen je pojam *solarnih ćelija* kao uređaja za konverziju sunčeve svetlosti u električnu energiju. Opisana je uloga elektrode u solarnih ćelijama i nedostaci konvencionalnih rešenja za elektrode koji mogu biti nadomešteni novim strukturama, koje su bile predmet istraživanja ove teze. Nova generacija solarnih ćelija na bazi organske (plastične) elektronike je predstavljena, zajedno sa kritičkim osvrtom na prednosti i nedostatke koje bi trebalo rešiti. Spomenuta je, takođe, problematika degradacije solarnih ćelija. Na kraju je izložen predmet rada disertacije.

Teorijski deo je sastavljen je iz tri dela. U prvom delu su opisane srebrne nanostrukture sa posebnim osvrtom na nano-žice srebra, dendrite srebra i kristalne defekte koji se javljaju u njihovoj strukturi. U ovom poglavlju su pomenute metode sinteze, struktura, svojstva i primene nano-žice srebra i dendrita srebra. U drugom delu je opisan fotonaponski efekat, vrste solarnih ćelija kao i prednosti i mane organskih solarnih ćelija u odnosu na ostale solarne tehnologije. U ovom delu opisan je i pojam heterospoja, princip rada i procesi koji smanjuju efikasnost konverzije solarne ćelije. Opisana je, takođe, arhitektura organskih solarnih ćelija sa ulogama pojedinačnih slojeva kao i fizičke veličine koje karakterišu solarne ćelije. Treći deo je posvećen ugljeničnim nanomaterijalima – višezidnim i jednozidnim nanocevima kao i grafinu. Ovde su spomenute metode sinteze ugljeničnih nanomaterijala i njihove primene, sa posebnim osvrtom na njihovu ulogu kao punilaca (ojačivača) u polimernih nanokompozitima. Na kraju, bilo je reči i o polivinil butiralu, dobro poznatom materijalu, koji je korišćen u istraživanju prezentovanom u ovoj tezi, vezanom za polimerne nanokompozite.

Eksperimentalni deo je sastavljen iz šest delova. Prvi deo pokriva metode sinteze i procesiranja korišćene u disertaciji: nanošenje filmova metodom rotirajućeg diska, nanošenje filmova metodom pokretnog noža, elektrodepoziciju, depoziciju atomskih slojeva, termičko naparavanje u vakuumu. Drugi deo pokriva metode karakterizacije: spektroskopiju u ultraljubičastom i vidljivom spektru, Raman spektroskopiju, nanoindentaciju i strukturnu karakterizaciju skenirajućom i transmissionom elektronskom mikroskopijom, sa detaljnim osvrtom na sve metode transmisione elektronske mikroskopije korišćene u ovoj disertaciji. Treći deo disertacije se odnosi na postupak sinteze, procesiranja i karakterizacije nano-žica srebra i nanokompozita nano-žice srebra/cink oksid dopiran aluminijumom. Četvrti deo disertacije se odnosi na postupak procesiranja i karakterizacije organskih solarnih ćelija kao i nano-žica srebra korišćenih u pomenutim ćelijama. Peti deo disertacije se odnosi na postupak sinteze, procesiranja i karakterizacije dendrita srebra. Šesti deo disertacije se odnosi na postupak procesiranja i karakterizacije polimernih nanokompozita sa jednozidnim ugljeničnim nanocevima, višezidnim

ugljениčnim nanocevima i grafinom kao nanopuniocima. Za sve vrste procesiranja korišćene u izradi ove teze navedene su hemikalije i uslovi korišćeni prilikom procesiranja i karakterizacije uzoraka, zajedno sa vrstom i nazivima korišćenih uređaja.

Poglavlje u kojima su prezentovani rezultati podeljeno je u četiri dela. U prvom delu su prikazani rezultati vezani za nano-žice srebra i nano-kompozite na bazi nano-žica srebra. Korišćenjem skenirajuće i transmisione elektronske mikroskopije dokazano je da, prilikom zagrevanja, atomi srebra iz područja nano-žice sa malim poluprečnikom zakrivljenja difunduju i inkorporiraju se u zavarenu zonu između dve nano-žice, čija je kristalografska orijentacija nasleđena od nano-žice sa velikim poluprečnikom zakrivljenja. Ugao kvašenja između dve nano-žice manji je od 4.8° , što je indikator potpunog kvašenja u čvrstom stanju. U drugom delu su prikazani rezultati vezani za karakterizaciju organskih tandem solarnih ćelija na bazi heterospoja, jedne ćelije sa dva aktivna sloja – dvostruka tandem solarna, i druge ćelije sa tri aktivna sloja – trostruka tandem solarna ćelija. Skenirajuća i transmisiona elektronska mikroskopija u kombinaciji sa spektroskopijom na bazi disperzije energije X-zraka korišćene su kako bi se dobio uvid u mikrostrukturu svih slojeva ćelije i raspodela elemenata u solarnim ćelijama i omogućila precizna analiza debljine slojeva i njihova morfologija. U trećem delu prikazani su rezultati dobijeni detaljnom analizom nastanka defekata strukture tokom formiranja dendrita srebra tj. nastanka proizvoljno raspodeljenih dvojnika i grešaka u redosledu na kristalografskim ravnima tipa $\{111\}$. Ovo je utvrđeno korišćenjem slika orijentacione mikroskopije, dobijenih difrakcijom elektrona rasejanih unazad. Takođe, ustanovljena su dva tipa dvojnika, međusobno rotirana za 60° , identifikovana u osnovnoj frontalnoj $\{111\}$ ravni dendrita. U četvrtom delu su prikazani rezultati vezani za polimerne nanokompozite procesirane iz rastvora, sa polivinil butiralom kao matricom i ugljениčnim materijalima kao više-zidnim ugljениčnim nanocevima, jedno-zidnim ugljениčnim nanocevima i grafinom kao nanopuniocima. Dokazano je da, dodatkom jednog masenog % ugljениčnih nanopunioca u polimernu matricu, mehanička svojstva, dobijena nanoindentacijom, se znatno poboljšavaju ali ne na značajan uštrb optičnih svojstava. Najveće poboljšanje od $\sim 66\%$ za redukovani modul i $\sim 50\%$ za tvrdoću pokazao je nanokompozit sa grafinom kao puniocem iako je, u odnosu na ostale kompozite, pokazao najnižu optičku transmisiju od 84% . Važno je napomenuti da značajno poboljšanje mehaničkih svojstava nije praćeno značajnim povećanjem provodljivosti. Ramanova spektroskopija je potvrdila uspostavljanje spoja na graničnoj površini između matrice i nanopunioca koje je rezultiralo poboljšanim mehaničkim svojstvima u odnosu na čist polimer.

U poglavlju Diskusija razmatrani su i objašnjeni fenomeni vezani za rezultate dobijene u toku izrade ove doktorske disertacije, uz osvrt na relevantnu literaturu, kako bi se stavili u ogovarajući kontekst.

U poglavlju Zaključak i dalji plan rada sumirani su najznačajniji rezultati proistekli iz ove doktorske disertacije, kao i dalji plan naučno-istraživačkog rada, koji bi predstavljao prirodan nastavak dosadašnjeg rada.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Na osnovu sveobuhvatnog i detaljnog pregleda najnovije naučne literature, može se reći da sprovedena istraživanja u okviru ove doktorske disertacije spadaju u veoma aktuelno polje istraživanja u oblasti nanokompozita za primenu u optoelektronici, odnosno solarnim (fotonaponskim) ćelijama.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji je navedeno ukupno 533 referenci, zaključno sa referencama iz 2016. godine. Najveći broj citiranih referenci čine radovi iz vrhunskih međunarodnih časopisa zatim stručna literatura u vidu knjiga i doktorskih disertacija kao i podaci iz industrije i međunarodnih udruženja za obnovljive izvore energije, sa tematikom značajnom za izradu doktorske disertacije. Literatura obuhvata radove koji su vezani za teorijske aspekte organskih poluprovodnika, fundamentalnih radova koji se bave difuzijom u čvrstom stanju uključujući mobilnost atoma srebra na različitim kristalografskim facetama, radove koji se odnose na nanostrukture srebra, transparentne elektrode, organske solarne ćelije, polimerne nanokompozite i ugljenične nanocevi i grafina. Pored ovoga, literatura se odnosila na sve vrste metoda koje su se koristile u izradi ove disertacije: spektroskopija vidljivog i infracrvenog zračenja, Raman spektroskopija, nanoindentacija, skenirajuća i transmisiona elektronska mikroskopija, itd. U okviru literaturnih navoda, nalaze se i reference kandidata dipl. ing. Vuka V. Radmilovića, koje su proistekle u toku izrade ove disertacije objavljene u vrhunskim međunarodnim časopisima.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U okviru realizacije doktorske disertacije korišćene su sledeće metode za procesiranje i karakterizaciju hibridnih nanokompozitnih materijala:

- Nanošenje tankih filmova metodom rotirajućeg diska (*spin coating*): U eksperimentima su polimerni nanokompoziti i dendriti srebra nanešeni na supstrate korišćenjem metodom rotirajućeg diska uređajem *Model WS-400BX-6NPP-LITE, Laurell Technologies Corporation*.
- Nanošenje tankih filmova metodom pokretnog noža (*doctor blading*): U eksperimentima su nano-žice srebra i slojevi solarnih ćelija nanešeni metodom pokretnog noža uređajem *Zehntner ZAA 2300*.
- Nanošenje tankih filmova metodom depozicije atomskih slojeva (*atomic layer deposition*): U eksperimentu je metodom depozicije atomskih slojeva nanešen sloj cink oksida dopiranim aluminijumom, koristeći uređaj *BENEQ TFS200 ALD system*.
- Nanošenje tankih filmova metodom termalne evaporaciju u vakuumu (*Thermal vacuum evaporation*): U eksperimentu je metodom termalne evaporaciju u vakuumu nanešen sloj molibden oksida i sloj srebra, koristeći uređaj *Leybold Univex 350G*.
- Karakterizacija mehaničkih svojstava tankih filmova metodom nanoindentacije: U eksperimentu su, metodom nanoindentacije, karakterisana mehanička svojstva polimernih nanokompozita kao što su tvrdoća i redukovani modul elastičnosti, korišćenjem uređaja *Hysitron TriboIndenter*.
- Karakterizacija optičkih svojstava tankih filmova metodom spektroskopije u ultraljubičastom i vidljivom spektru: U eksperimentima su, metodom spektroskopije, karakterisana optička transmisija nano-žica srebra, nanokompozita nano-žice srebra/cink oksid dopiran aluminijumom, dendrita srebra, organskih solarnih ćelija kao i polimernih nanokompozita, korišćenjem uređaja *Varian Cary 5000 UV/Vis/NIR, Perkin Lambda 950, BioTek Synergy 4 Plate*.
- Karakterizacija električnih svojstava tankih filmova metodom četiri tačke: U eksperimentima su, metodom četiri tačke, karakterisana električna otpornost nano-žica srebra, nanokompozita nano-žice srebra/cink oksid dopiran aluminijumom, dendrita srebra,

organskih solarnih ćelija kao i polimernih nanokompozita, na uređajima *Keithley 2636A Sourcemeter*, *Keithley 4200-SCS, R-Check Surface Resistivity Meter*.

- Karakterizacija fotoelektričnih svojstava solarnih ćelija: U eksperimentima su karakterisana optoelektrična svojstva silicijumske solarne ćelije i organskih solarnih ćelija kojima se meri ukupna efikasnost. Korišćeni su uređaji *BoTest source measurement unit* sa iluminacijom dobijenom iz simulatora *Newport Oriel Sol 1A*.
- Mikrostrukturalna karakterizacija uzoraka je vršena metodama optičke mikroskopije, skenirajuće elektronske mikroskopije u tandemu sa fokusiranim jonskim snopovima i transmisione elektronske mikroskopije. U eksperimentima su, metodama skenirajuće elektronske mikroskopije i transmisione elektronske mikroskopije, karakterisane mikrostrukture i morfologije nano-žica srebra, nanokompozita nano-žice srebra sa cink oksidom dopiranim aluminijumom, zavarenih spojeva između nano-žica srebra, dendrita srebra, organskih solarnih ćelija, ugljeničnih nanomaterijala kao i polimernih nanokompozita. Korišćeni uređaji uključuju: *FEI Helios Nanolab 660 DualBeam FIB*, *FEI Strata 235 dual beam FIB*, *FEI TITAN³ Themis 60-300*, *FEI Titan-X*, *FEI TEAM_1*, *FEI TEAM 0.5*.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Na osnovu rezultata prezentovanih u okviru ove teze može se zaključiti da je ostvaren veliki doprinos u razumevanju: 1. uloge kvašenja u čvrstom stanju u formiranju inicijalnog spoja između nanožica i geometrijskih faktora koji utiču na formiranje spoja, 2. mehanizma zavarivanja nano-žica srebra, 3. strukture organskih tandem solarnih ćelijama na bazi heterospoja, 4. fenomena nastanka defekata strukture tokom formiranja dendrita srebra kao i 5. poboljšanje mehaničkih svojstava materijala za enkapsulaciju solarnih ćelija. Ostvareni rezultati pružaju uvid u strukturu i procese koji do sada nisu bili detaljno analizirani, čime se doprinosi projektovanju (dizajniranju) efikasnijih i postojanijih komponenata za solarne ćelije kao i celih solarnih ćelija. Verifikacija ostvarenih rezultata u okviru ove disertacije manifestovana je objavljivanjem naučnih radova u najuglednijim međunarodnim naučnim časopisima iz ove oblasti, što potvrđuju impresivne vrednosti faktora uticaja tih časopisa.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Na osnovu dosadašnjeg rada i pokazanih rezultata tokom doktorskih studija i u okviru naučnoistraživačkog rada, diplomirani inženjer tehnologije Vuk Radmilović je pokazao izuzetnu sklonost i sposobnost za bavljenje naučno-istraživačkim radom. Iz same predložene teme disertacije, kandidat je do sada objavio pet radova u međunarodnim časopisima sa SCI liste (prvi autor na dva rada) i 6 saopštenja na međunarodnim skupovima. Šesti rad koji se bavi zavarivanjem nano-žica srebra: **Radmilović V.V.**, Göbelt M., Christiansen S., Spiecker E., Radmilovic V.R., Low Temperature Solid-State Wetting and Formation of Welds in Silver Nanowires, *Advanced Functional Materials*, (IF 11.382) (ISSN 1616-3028), na kome je Vuk Radmilović prvi autor, takođe je završen, i u međuvremenu će biti podnešen za publikovanje.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

U doktorskoj disertaciji su ostvareni sledeći naučni doprinosi:

- Pokazano je da se kvašenje i zavarivanje pri zagrevanju odvijaju samo između nano-žica srebra koje su u kontaktu preko delova strukture čiji su poluprečnici zakrivljenja jako različiti. Atomi srebra iz područja nano-žice sa malim poluprečnikom zakrivljenja difunduju i inkorporiraju se u zavarenu zonu između dve nano-žice, čija je kristalografska orijentacija nasleđena od nano-žice sa velikim poluprečnikom zakrivljenja.
- Debljina slojeva u organskim tandem solarnim ćelijama na bazi heterospoja, izuzev mreže nano-žica srebra, je uniformna. Metode koje baziraju na transmisioj elektronskoj mikroskopiji, u tandemu sa mikro-hemijskom analizom, najprecizniji su način za merenje debljine slojeva solarnih ćelija i ispitivanje mešanja između slojeva. Difuzija atoma prisutnih elemenata između slojeva organskih solarnih ćelija nije detektovana.
- Osnovno stablo dendrita srebra raste u pravcu $[112]$, dok grane dendrita rastu u pravcima $[2\bar{1}\bar{1}]$ i $[12\bar{1}]$. Rast dendritnih grana u pravcima $\langle 112 \rangle$ tipa uslovljen je relativnim odnosom dužine stabilnih 111 i 200 stepenica i ledževa. Ustanovljena su dva tipa dvojnika, međusobno rotirana za 60° , proizvoljno raspoređenih u $\{111\}$ frontalnoj ravni dendrita.
- Povećan je redukovani modul elastičnosti i tvrdoća filmova dodatkom nano-ojačivača, a najbolji rezultat pokazao je nanokompozit polivinil butiral – grafin.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet celokupne disertacije su nanokompozitni materijali za primenu u solarnim ćelijama. Posebna pažnja je posvećena izučavanju nanokompozita na bazi nano-žica srebra i mehanizama termalno aktiviranog postupka njihovog zavarivanja, sa idejom postizanja zadovoljavajuće kombinacije optoelektronskih svojstava. Procesiranje i karakterizacija uzoraka rađena je na najsavremenijim uređajima na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, Fridrih Aleksandar Univerzitetu u Erlangenu, Nemačka i Kalifornija Univerziteta u Berkliju, Sjedinjene Američke Države. Rezultati proistekli iz istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji značajno su unapredili postojeća naučna znanja iz oblasti optoelektronike-solarnih ćelija, u kojima se metalne nanožice i nano-kompoziti koriste za izradu elektroda.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidat dipl. inž. Vuk V. Radmilović do sada je, kao prvi autor i koautor, objavio i saopštio sledeće radove koji uključuju eksperimentalne rezultate koji su ostvareni radom u okviru ove disertacije:

Kategorija M 21a:

1. Guo F., Li N., **Radmilović V. V.**, Radmilović V. V., 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 & Environmental Science*, Volume 8, pp. 1690-1697, 2015 (IF 25.427) (ISSN: 1754-5706)

2. Guo F., Li N., Fecher F., Gasparini N., Quiroz C. O. R., Bronnbauer C., Hou Y., **Radmilović V. V.**, Radmilović 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*, Volume 6, Article No. 7730, 2015 (IF 11.329) (ISSN: 2041-1723)

3. Göbelt M., Keding R., Schmitt S. W., Hoffmann B., Jäckle S., Latzel M., **Radmilović 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*, Volume 16, pp. 196-206, 2015 (IF 11.553) (ISSN: 2211-2855)

Kategorija M 21:

1. **Radmilović V.V.**, Kacher J., Ivanović E.R., Minor A.M., Radmilović V.R., Multiple Twinning and Stacking Faults in Silver Dendrites, *Crystal Growth & Design*. Volume 16, pp. 467-474, 2016 (IF 4.425) (ISSN: 1528-7483)

Kategorija M 22:

1. **Radmilović V.V.**, Carraro C., Uskoković P.S., Radmilović V.R., Structure and Properties of Polymer Nanocomposite Films with Carbon Nanotubes and Graphene, *Polymer Composites*, DOI: 10.1002/pc.24079, 2016 (IF 2.004) (ISSN 1548-0569)

Kategorija M 34:

1. **Radmilović V.V.**, Stojanović D., Uskoković P.S., Aleksić R., Radmilović V.R., "Structure and properties of polyvinyl butyral based nanocomposites", *Fifteenth Annual Conference YUCOMAT 2013*, Herceg Novi, Montenegro, 2013, Book of Abstracts p.114, ISSN: 978-86-80321-18-9.

2. **Radmilović V.V.**, Carraro C., Uskoković P.S., Aleksić R., Radmilović V.R., "Raman Spectroscopy and electron microscopy of polymer based nanocomposites with carbon nanotubes and graphene", *Sixteenth Annual Conference Yucomat 2014*, Herceg Novi, Montenegro, 2014, Book of Abstracts p. 92, ISSN: 978-86-80321-18-9.

3. **Radmilović V.V.**, Göbelt M., Christiansen S., Spiecker E., Radmilovic V.R., "Silver Nanowire Based Networks for Transparent Electrode Applications", *Seventeenth Annual Conference Yucomat 2015*, Herceg Novi, Montenegro, 2015, Book of Abstracts p. 17, ISSN: 978-86-80321-18-9.

4. **Radmilović V.V.**, "Silver Nanowires as electrodes in solar cells", *The 14th Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering*, Belgrade, Serbia, 2015, Book of Abstracts p. 19, ISBN: 978-86-80321-26-4.

5. **Radmilović V.V.**, Göbelt M., Christiansen S., Spiecker E., Radmilović V.R., "Ag/ZnO Core/Shell Nanowires for Solar Cell Applications", *Junior Euromat 2016*, Lausanne, Switzerland, 2016, Book of Abstracts p. 65. ISBN 978-2-8399-1926-5.

6. **Radmilović V.V.**, Guo F., Brabec C.J., Spiecker E., Radmilović V.R., "Structural characterization of organic bulk heterojunction solar cells", *Eighteenth Annual Conference Yucomat 2016*, Herceg Novi, Montenegro, 2016, Book of Abstracts p.19. ISBN: 978-86-919111-1-9.

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu svega izloženog, Komisija smatra da doktorska disertacija pod nazivom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“ kandidata Vuka V. Radmilović, dipl. inž. tehnologije, pripada naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, što je potvrđeno radovima objavljenim u vrhunskim međunarodnim časopisima kao i brojnim saopštenjima na međunarodnim naučnim skupovima.

Imajući u vidu neuobičajeno veliki obim i kvalitet dobijenih rezultata, mogućnost njihove primene u praksi, kao i sposobnosti koje je kandidat pokazao, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta da prihvati ovaj izveštaj i da se doktorska disertacija pod nazivom „Transparentni nanokompozitni filmovi za primenu u plastičnoj elektronici - Transparent nanocomposite films for plastic electronics applications“ kandidata Vuka V. Radmilović, dipl. inž. tehnologije, prihvati, izloži na uvid javnosti i nakon isteka zakonom predviđenog roka, uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 22. 9. 2016. godine

ČLANOVI KOMISIJE

Dr Petar Uskoković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Akademik Dr Zoran Popović, naučni savetnik
Institut za Fiziku, Beograd

Dr Đorđe Janačković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Vesna Radojević, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Erdmann Spiecker, redovni profesor
Univerzitet Erlangen-Nirnbreg, Institut za Mikro i
Nanostrukturna Istraživanja