

35/367
(Број захтева)
31.08.2016.
(датум)

(назив већа научне области коме се захтев упућује)

Београд, Студентски трг бр. 1

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

Мр ТАТЈАНЕ (Александар) ЂАКОВ, дипл. инж.
(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ: **Мр ТАТЈАНА (Александар) ЂАКОВ, дипл. инж.**

пријавила је докторску дисертацију под називом:

„Полиимидне конзоле за примену у микро-електро-механичким системима (МЕМС)“

Из научне области: **ХЕМИЈА И ХЕМИЈСКА ТЕХНОЛОГИЈА**

Универзитет је дана **23.11.2015.** године, својим актом **02 број: 61206-5061/2-15**, дао сагласност
на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

„Полиимидне конзоле за примену у микро-електро-механичким системима (МЕМС)“.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата:

Мр ТАТЈАНЕ (Александар) ЂАКОВ, дипл. инж.
(име, име једног од родитеља и презиме)

образована је на седници одржаној **14.04.2016.** године Одлуком Факултета под бр. **35/171**, у
саставу:

Име и презиме	Звање	Научна област
1. Др Иванка Поповић	Редовни професор	Полимерно инжењерство
2. Др Љубинка Рајаковић	Редовни професор	Аналитичка хемија
3. Др Весна Радојевић	Редовни професор	Инжењерство материјала
4. Др Мелина Калагасидис Крушић	Ванредни професор	Полимерно инжењерство
5. Др Весна Јовић	Научни саветник	Наука о материјалима

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске
дисертације на седници одржаној дана **23.06.2016.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Ђорђе Јанаковић

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и чл. 129. Статута ТМФ-а, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 23.06.2016. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Иванка Поповић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Љубинка Рајаковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Весна Радојевић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Мелина Калагасидис Крушић, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Весна Јовић, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Полиимидне конзоле за примену у микро-електро-механичким системима (МЕМС)“** коју је поднела **мр ТАТЈАНА ЂАКОВ** 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 Татјане Ђаков под називом „Полиимидне конзоле за примену у микро-електро-механичким системима (МЕМС)“ Одлуком 02 број: 61206-5061/2-15 од 23.11.2015. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија М22

1. **T. Đakov**, Lj. Rajaković, I. Popović, Metal-polymer and polymer-polymer microcantilevers: promising alternative to Si-based MEMS, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(11) (2015) 8698-8706 (ISSN 0957-4522, IF (2013)=1.996) [DOI 10.1007/s10854-015-3545-7](https://doi.org/10.1007/s10854-015-3545-7)

Категорија М 23

1. **T.A. Djakov**, I.G. Popovic, Lj.V. Rajakovic, Micro-electro-mechanical systems (MEMS): Technology for the 21st century, Hemijska industrija 68(5) (2014) 629-641 (ISSN 0367-598 X, IF(2013)=0.562) [DOI: 10.2298/HEMIND131008091D](https://doi.org/10.2298/HEMIND131008091D)

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, докторанду, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidatkinje mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije

Odlukom br. 35/171 od 14. 04. 2016. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidatkinje mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom: „**Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)**“.

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

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije:

- 17. 09. 2015. godine – Kandidatkinja mr Tatjana Đakov, dipl. inž. tehnologije, prijavila je temu za doktorsku disertaciju pod naslovom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“, a Nastavno-naučno veće Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu donelo je Odluku o imenovanju Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije pod nazivom: „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ (35/376 od 23.09.2015.) mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije.
- 22. 10. 2015. godine - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu usvojen je izveštaj Komisije za ocenu naučne zasnovanosti predložene teme doktorske disertacije pod nazivom: „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ a za mentore ove doktorske disertacije imenovane su dr Ivanka Popović, redovni profesor i dr Ljubinka Rajaković, redovni profesor, obe sa Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu (35/496 od 30.10.2015.).
- 23. 11. 2015. godine - Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ (61206-5061/2-15 od 30.11.2015).
- 14. 04. 2016. godine - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ (35/171).

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju oblasti Hemija i hemijska tehnologija za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Za mentore ove

doktorske disertacije su imenovane dr Ivanka Popović, redovni profesor i dr Ljubinka Rajaković, redovni profesor, obe sa Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, koje su na osnovu dosadašnjih objavljenih publikacija i iskustva kompetentne da rukovode izradom ove disertacije. Prof. Popović je do sada objavila preko 60 radova u časopisima sa SCI liste, rukovodila je izradom 6 magistarskih teza i bila član više od 10 Komisija za ocenu i odbranu, rukovodi i rukovodila je izradom 7 doktorskih disertacija i bila je član Komisije za ocenu i odbranu 10 doktorata. Prof. Rajaković je objavila 76 radova u časopisima sa SCI liste, rukovodila je izradom 8 (kao mentor) i 2 (kao komentor) doktorskih disertacija.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Kandidat mr Tatjana Đakov je rođena u Beogradu 11.09.1970. godine, gde je pohađala i završila osnovnu školu i gimnaziju sa odličnim uspehom. Školske 1989/90. godine upisala je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, smer Hemijsko inženjerstvo, koji je završila 1994. godine, sa prosečnom ocenom 8,87. Iste godine upisala je poslediplomske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu, odsek Hemija i inženjerstvo polimera, pri Katedri za Organsku hemijsku tehnologiju. Magistarsku tezu pod nazivom „Kinetika radikalne polimerizacije di-2-hloretil itakonata“ odbranila je 1997. godine (prosečna ocena tokom studija 9,78).

Od 1994. godine do danas, mr Tatjana Đakov je učestvovala u nastavi iz većeg broja predmeta na smerovima Organska hemijska tehnologija, Hemijsko inženjerstvo i Inženjerstvo zaštite životne sredine, odnosno studijskim profilima Hemijsko inženjerstvo i Inženjerstvo zaštite životne sredine. U periodu 1994-1997. godine kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije, učestvovala je u realizaciji eksperimentalnih (i delom računskih vežbi) iz predmeta Prerada polimernih materijala i Tehnologija sinteze polimera (IV godina studija), na Katedri za OHT. U periodu od 1997. do 2008. godine (u svojstvu asistenta-saradnika, saradnika-istraživača i asistenta) vodila je računske vežbe iz predmeta Termodinamika tehnoloških procesa (III godina studija), kao i računske i eksperimentalne vežbe iz predmeta Tehnologija prerade nafte i Tehnologija petrohemijskih proizvoda (IV godina studija). Od školske 2006/07. godine vodila je računske vežbe iz predmeta Materijalni i energetski bilansi (II godina studija), a od školske 2007/08. godine vodi računske vežbe iz predmeta Osnovi petrohemijskog inženjerstva (III godina studija). Od iste školske godine do 2011. god. učestvovala je u realizaciji nastave iz predmeta Reciklaža polimernih materijala (V godina studija). U periodu 2009-2013. god. vodila je računske vežbe i izradu projekata na predmetu Projektovanje procesa u inženjerstvu zaštite životne sredine (IV i V godina studija), a u periodu 2011-2013. god. i na predmetu Projektovanje opreme i procesa u inženjerstvu zaštite životne sredine (IV godina studija). Od školske 2009/10. godine vodi eksperimentalne i računske vežbe iz predmeta Uvod u Hemijsko inženjerstvo (II godina studija).

Kao DAAD stipendista, mr Tatjana Đakov je boravila na usavršavanju u Nemačkoj, u Državnom institutu za ispitivanje materijala (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM), u Berlinu, u trajanju od 6 meseci (1994,1995), kao i na stručnom usavršavanju u Nemačkoj, Univerzitet u Kaselu, u trajanju od deset meseci (1997-1998). U periodu 2012-2014. godine boravila je na stručnom usavršavanju u Velikoj Britaniji, u Centru za mikro- i nanotehnologije Instituta „Science & Technology Facilities Councili“ (Micro and Nano Technology Centre, Rutheford Appleton Lab., STFC) u Oksfordu u ukupnom trajanju od 11 nedelja.

U junu 2000. godine je izabrana za asistenta na Katedri za OHT, a od 2012. godine je u zvanju stručnog saradnika na istoj Katedri.

Član je Srpskog hemijskog društva, govori engleski i ruski jezik, a služi se nemačkim i francuskim jezikom.

Oblasti naučnog interesovanja kandidatkinje mr Tatjane Đakov: tanki polimerni filmovi, mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS), instrumentalne metode, petrohemija, degradacija polimera, reciklaža polimera.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj Disertacije

Doktorska disertacija kandidatkinje mr Tatjane Đakov, dipl. inženjera tehnologije odgovara formi zahtevanoj od strane Univerziteta u Beogradu. Predata disertacija napisana je na 145 strana u okviru kojih se nalaze 85 slika, 8 tabela, i 162 literaturna navoda i organizovana je u 6 celina: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati, Zaključak i Literatura. Na početku disertacije dat je kratak Rezime na srpskom i engleskom jeziku, a Biografija i tri izjave kandidatkinje su date na kraju disertacije.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U Uvodu je definisan predmet istraživanja i predstavljeni su ciljevi doktorske disertacije. Istaknuti su najvažniji doprinosi istraživanja sprovedenih u okviru ove disertacije.

Teorijski deo je organizovan u tri poglavlja. U prvom poglavlju je dat pregled važnijih pojmova iz oblasti mikro-elektro-mehaničkih sistema (MEMS). Prikazani su pravci razvoja, primena i materijali za MEMS, uz poseban osvrt na mikrosenzore i mikropokretače, kao osnovne delove MEMS struktura. U drugom poglavlju su predstavljeni osnovni pojmovi iz oblasti poliimida (PI), proces dobijanja, specifičnost materijala i primenu PI. U trećem poglavlju je pažnja posvećena svojstvima, karakterisanju, kao i tehnikama nanošenja tankih polimernih filmova.

U eksperimentalnom delu doktorske disertacije optimizovan je postupak dobijanja tankih PI filmova spin tehnikom, na osnovu čega su napravljene serije tankih poliimidnih (PI) filmova tačno definisanih debljina (2-10 μm) uz variranje temperature umrežavanja (275 °C-375 °C, sa korakom od 25 °C), u dva temperaturna režima zagrevanja filma do krajnje temperature na kojoj se odvija umrežavanje (linearni i stepenasti profil). Debljina PI filmova je određena pomoću uređaja Filmetrics F70. Korišćenjem optičkog mikroskopa je određen kvalitet umreženih filmova. Step imidizacije PI filmova je praćen FTIR spektroskopijom. Površina svih PI filmova je snimljena pomoću AFM tehnike u kontaktnom režimu (2D i 3D). Toplotna svojstva tankih poliimidnih filmova (koeficijent toplotnog širenja, α , temperatura prelaza u staklasto stanje, T_g) su određena korišćenjem termomehaničke analize (TMA). Temperatura prelaza u staklasto stanje, T_g , je takođe određena i pomoću nove tehnike lokalne termo analize (LTA).

Na osnovu rezultata ispitivanja tankih PI filmova i rezultata simulacije PI konzola, odabran je dizajn za mikrokonzole na bazi bimorfne struktura metal- poliimid (Au-PI) i poliimid-poliimid (PI-PI). Pomoću optičkog mikroskopa određen je početni otklon mikrokonzola. Termičko testiranje bimorfne mikrokonzole se sastojalo iz ispitivanja statičkog i dinamičkog odziva Au-PI i PI-PI struktura. Statički odziv mikrokonzole je praćen pomoću dve metode, a rezultati su upoređeni. Prva metoda se zasniva na praćenju pomeraja mikrokonzole pomoću laserskog zraka, pri čemu su urađene serije merenja rastojanja rasute svetlosti u temperaturnom intervalu od 25 °C do 100 °C. Druga metoda se zasniva na merenju pomeraja pomoću digitalne kamere koja je montirana na fotocev optičkog mikroskopa. Eksperimentalna aparatura, kao i procesiranje slika je kompjuterski kontrolisano pomoću LabView softverskog paketa.

U poglavlju Rezultati su na osnovu eksperimentalnih ispitivanja toplotnih karakteristika tankih poliidimnih filmova izvedene korelacije između debljine filma i koeficijenta toplotnog širenja, α , kao i temperature prelaza u staklasto stanje, T_g . Rezultati dobijeni pomoću LTA metode su upoređeni sa rezultatima koji su dobijeni pomoću standardne TMA. Na osnovu eksperimentalnih podataka optimizovani su procesni parametri i urađena je simulacija, funkcionalizacija, modelovanje i priprema nove generacije bimorfni mikrosenzora i mikropokretača tipa zlato-poliimid (Au-PI) i poliidim-poliimid (PI-PI). Softverski programski paket Intellisuite & ThermoElectroMechanical (TEM) – modelovanje za mikro-elektro-mehaničke sisteme (MEMS) koji se zasniva na metodi konačnih elemenata je korišćen za simulacije mikrokonzola sa ciljem da se dobije preliminarna procena novih materijala koji su predloženi za dizajn mikrokonzola. Postavljen je analitički model za statički i dinamički odziv bimorfni konzola pri toplotnoj pobudi, a dobijeni eksperimentalni rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim iz analitičkog modela.

Na kraju rada izveden je Zaključak u kome su koncizno izneti postignuti rezultati u istraživanju, a koji odgovaraju postavljenim ciljevima disertacije i dat je spisak korišćene literature, biografija kandidata, izjave o autorstvu, o korišćenju i istovetnosti štampane i elektronske verzije rada.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Oblast mikro-elektro-mehaničkih sistema (MEMS) se intenzivno razvija i širi u poslednje tri decenije. MEMS uređaji predstavljaju minijaturne elektromehaničke sisteme (uređaje i strukture) koji mogu da registruju promene u okolini, da ih analiziraju i procesiraju pomoću mikroelektronike. Pored toga što su minimalnih dimenzija, MEMS su energetski i ekonomski povoljni materijali, adaptabilni (lako se integrišu u druge sisteme i lako se modifikuju), a karakteriše ih i velika otpornost na vibracije, udar i zračenje. MEMS i delovi za MEMS uređaje se proizvode od silicijuma, polimera, metala, keramike i kompozitnih materijala. Najzastupljeniji materijal koji se koristi za proizvodnju integrisanih kola je silicijum. Iako se veliki deo elektronske industrije oslanja na industriju silicijuma, proizvodnja kristalnog silicijuma je kompleksna i relativno skupa, pa se akcenat poslednjih godina sve više stavlja na zamenu silicijuma drugim materijalima. Polimeri predstavljaju adekvatnu zamenu, jer mogu da se proizvode u velikim količinama uz raznovrsne toplotne, električne i mehaničke karakteristike, za razliku od klasičnih materijala. Osnovne prednosti polimera su elastičnost, optička svojstva i biokompatibilnost. Među polimerima, polimidi (PI) imaju visoku termičku i hidrolitičku stabilnost, odličnu otpornost na hemikalije, dobra adhezivna svojstva i mehaničku čvrstoću, biohemijsku kompatibilnost. Polimidi su raznovrsni, mogu da se modifikuju u foto-osetljive ili foto-neosetljive, piezoelektrične ili nepiezoelektrične, u magnetne ili nemagnetne, iz neprovodnih u provodne. S obzirom da je upotreba tankih polimernih filmova u velikoj ekspanziji poslednjih godina u raznim oblastima od mikrofluidike, mikroelektronike, MEMS uređaja (senzora i pokretača) do biomedicine, biotehnologije i aeronautike, javila se potreba da se detaljnije ispituju određena svojstva tankih filmova koja mogu značajno da utiču na performanse samih uređaja. Toplotne karakteristike, kao što su koeficijent toplotnog širenja, α , i temperatura prelaza u staklasto stanje, T_g , spadaju u red najvažnijih karakteristika kada je reč o primeni tankih polimernih filmova. Literaturno dostupni podaci za svojstva polimera se odnose na materijale čija je debljina veća od 50 μm i njihove vrednosti su konstantne. Svojstva tankih polimernih filmova

mogu značajno da se razlikuju od svojstava tih istih materijala čija je debljina veća od 50 μm . S obzirom da se kod MEMS mikrokonzola radi o debljinama koje su manje od 10 μm , neophodno je ispitati svojstva odgovarajućih tankih polimernih filmova. U okviru ove doktorske disertacije je primenjen sveobuhvatni pristup karakterizaciji filmova pripremljenih spin tehnikom, sa ciljem da se dobiju novi podaci vezani za toplotne karakteristike tankih polimernih filmova ($<50 \mu\text{m}$), a neophodni kako bi se upotpunile baze podataka i pomoću njih omogućili tačniji proračuni i izvođenje simulacija u oblastima mikrofluidike, mikro-elektro-mehaničkih sistema (MEMS) i mikroelektronike. Uvedena je nova tehnika (LTA) za određivanje temperature prelaza u staklasto stanje, T_g . Polimerni mikrokonzole su ispitane pod različitim temperaturnim uslovima sa ciljem da se dobiju i procene efekti toplotne pobude na ponašanje samih konzola i da se sagleda mogućnost primene ovakvih struktura.

Rezultati ove doktorske disertacije daju uvid kako naučnoj javnosti, tako i industrijskom sektoru, o potencijalu za primenu ovih Au-PI i PI-PI bimorfni struktura kao ekonomski isplativih zamena za standardne Si-mikrokonzole. Na osnovu opsežnog pregleda literature, može se zaključiti da se istraživanja u okviru ove doktorske disertacije uklapaju u svetske trendove i ukazuju na značaj i aktuelnost proučavane problematike.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U literaturnom pregledu doktorske disertacije data su 162 literaturna navoda, od kojih najveći broj čine najnoviji radovi iz međunarodnih časopisa sa tematikom značajnom za izradu doktorske disertacije. Navedene reference su novijeg datuma i sadrže eksperimentalne rezultate istraživanja mnogih istraživača, analizu i diskusiju dobijenih rezultata i izvedene zaključke, kao i teorijske osnove primenjenih metoda ispitivanja, njihove mogućnosti i ograničenja. Kandidat je proširio do sada poznata fundamentalna znanja o polimernim materijalima, uticaju debljine tankih polimernih filmova (2-10 μm), kao i temperature umrežavanja na toplotna svojstva tankih filmova. Iz obrazloženja predložene teme doktorske disertacije i objavljenih radova koje je kandidatkinja priložila, kao i iz popisa literature koja je korišćena u istraživanju, uočava se adekvatno poznavanje predmetne oblasti istraživanja, kao i poznavanje aktuelnog stanja istraživanja u ovoj oblasti u svetu.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U ovoj doktorskoj disertaciji primenjene su savremene naučne metode za ispitivanje tankih polimernih filmova. Spin tehnika je korišćena za dobijanje tankih filmova. Debljina pripremljenih filmova je određena pomoću uređaja Filmetrics F20. Step imidizacije serije PI uzoraka praćen je FTIR spektroskopijom pomoću instrumenta FT-IR Perkin Elmer Inc., Spectrum GX.

Za sve serije PI urađena je termomehanička analiza (TMA) na uređaju TA INSTRUMENTS TMA 2940, sa ciljem da se odrede temperatura prelaza u staklasto stanje, T_g , i koeficijent toplotnog širenja, α . Lokalna termo analiza (LTA) je za sve PI filmove urađena korišćenjem mikroskopije skenirajućom sondom (MSS) (Veeco Dimension 3000) u kombinaciji sa Anasys Instruments(AI) nano-TA (NTA) opremom i Si(AI) mikropripremljenim toplotnim konzolama (ThermaLever AN2-300). Za skeniranje površine filmova korišćena je mikroskopija atomskih sila (AFM) u kontaktnom (tapkajućem) režimu rada.

Softverski programski paket Intellisuite 8 ThermoElectroMechanical (TEM) - modelovanje za Mikro-Elektro-Mehaničke Sisteme (MEMS) koji se zasniva na metodi konačnih elemenata

(IntelliSense Software Corp., 2010, USA) je korišćen za simulacije mikrokonzola. Optički mikroskop (Meiji Trinocular Zoom Stereo Microscope) je korišćen za određivanje kvaliteta umreženih PI filmova, kao i početnog otklona Au-PI i PI-PI konzola na temperaturi od 25 °C. Statički i dinamički odziv bimorfnih pobuđenih mikrokonzola beležen je pomoću digitalne kamere (Canon Powershot S5X 500/Nikon D 3100) koja je montirana na fotocev optičkog mikroskopa (Nikon Labophot).

3.4. Primenjivost ostvarenih rezultata

Na osnovu objavljenih literaturnih podataka iz ove oblasti, eksperimentalnih ispitivanja i dobijenih rezultata iz ovog rada, ostvaren je veliki doprinos u proširivanju fundamentalnih znanja o polimernim materijalima, sagledavanju uticaja debljine tankih poliimidnih filmova, temperature umrežavanja i temperaturnog profila umrežavanja na toplotna svojstva tankih PI filmova i primenu nove tehnike (LTA) za određivanje temperature prelaza u staklasto stanje, T_g . Odabrani tanki PI filmovi pokazali su se kao adekvatna zamena za silicijum kod bimorfnih MEMS struktura čime se otvara mogućnost razvoja nove generacije bimorfnih mikrosenzora i mikropokretača tipa metal-poliimid i poliimid-poliimid.

Verifikacija rezultata je potvrđena i od strane međunarodne naučne javnosti, objavljivanjem postignutih rezultata u vodećim međunarodnim časopisima iz domena ove problematike.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidatkinja mr Tatjana Đakov, dipl. inž. tehnologije je tokom izrade doktorske disertacije ispoljila izuzetnu stručnost u pretraživanju literature, pripremi i realizaciji eksperimenata, korišćenju različitih tehnika karakterizacije materijala i analizi i obradi rezultata. Na osnovu postignutih rezultata Komisija je mišljenja da kandidatkinja poseduje sve kvalitete koji su neophodni za samostalni naučno-istraživački rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Naučni doprinos ove doktorske disertacije ogleda se u:

- Proširivanju fundamentalnih znanja o polimernim materijalima,
- Sagledavanju uticaja debljine PI filma, temperature umrežavanja, kao i temperaturnog profila umrežavanja na toplotna svojstva tankih PI filmova (koeficijenta toplotnog širenja, α , i temperature prelaza u staklasto stanje, T_g) i uspostavljanju odgovarajućih korelacija.
- Uvođenju nove tehnike (LTA) za određivanje temperature prelaza u staklasto stanje, T_g .
- Utvrđivanju mogućnosti primene odabranih tankih PI filmova kao zamene za silicijum kod bimorfnih MEMS uređaja .
- Postavljanju analitičkog modela za statički i dinamički odziv bimorfnih konzola pri toplotnoj pobudi.
- Dobijanju nove generacije bimorfnih mikrosenzora i mikropokretača tipa metal-poliimid i poliimid-poliimid.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Istraživanja u okviru ove disertacije su koncipirana na osnovu definisanih ciljeva i detaljne analize literature iz oblasti dobijanja i karakterisanja nove generacije bimorfnih mikrosenzora i

mikropokretača tipa metal-poliimid i poliimid-poliimid za potencijalnu primenu kao senzora u industriji, biomedicini i biotehnologijama. U okviru ove doktorske disertacije primenjena je metodologija istraživanja zastupljena u literaturi, ali su primenjene i neke nove metode ispitivanja. Pregledom dostupne naučne literature može se zaključiti da postoji izuzetno mali broj podataka za toplotna svojstva tankih polimernih filmova (čije su debljine manje od 10 μm). S obzirom da se kod MEMS mikrokonzola radi o debljinama koje su manje od 10 μm , neophodno je ispitati svojstva odgovarajućih tankih poliimidnih filmova. Na osnovu dobijenih zavisnosti, može se zaključiti da za razliku od filmova debljine $\geq 50 \mu\text{m}$, vrednosti α i T_g nisu konstantne. Nova LTA metoda može se predložiti za određivanje T_g , kao dopuna ili alternativa standardnoj TMA kada se radi o ispitivanim poliimidnim tankim filmovima.

Uvidom u dostupnu literaturu iz ove oblasti istraživanja i rezultate istraživanja dobijene u okviru ovog rada, može se zaključiti da dobijeni rezultati predstavljaju korak za dalji razvoj i primenu Au-PI i PI-PI bimorfni struktura kao adekvatne zamene za silicijum kod MEMS uređaja, čime se otvara mogućnost razvoja nove generacije mikrosenzora i mikropokretača.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidatkinja mr Tatjana Đakov je svoje rezultate potvrdila objavljivanjem radova u vodećim međunarodnim i nacionalnim časopisima. Ukupno je objavila 9 naučnih radova (od čega 6 sa SCI liste). Iz disertacije su proistekla dva rada, jedan objavljen u istaknutom međunarodnom časopisu i jedan objavljen u međunarodnom časopisu.

Rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M 22)

1. **T. Đakov**, Lj. Rajaković, I. Popović, Metal-polymer and polymer-polymer microcantilevers: promising alternative to Si-based MEMS, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(11) (2015) 8698-8706 (ISSN 0957-4522, IF (2013)=1.996) DOI 10.1007/s10854-015-3545-7

Rad u međunarodnom časopisu (M 23)

1. **T.A. Djakov**, I.G. Popovic, Lj.V. Rajakovic, Micro-electro-mechanical systems (MEMS): Technology for the 21st century, Hemijska industrija 68(5) (2014) 629-641 (ISSN 0367-598 X, IF(2013)=0.562) DOI: 10.2298/HEMIND131008091D

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

5.1. Kratak osvrt na disertaciju u celini

Na osnovu svega napred iznetog Komisija smatra da doktorska disertacija kandidatkinje mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije pod nazivom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ predstavlja značajan i originalan naučni doprinos u oblasti Hemije i hemijske tehnologije, što je potvrđeno objavljivanjem radova u časopisima međunarodnog značaja. Predmet i ciljevi istraživanja su jasno navedeni i ostvareni. Komisija takođe smatra da doktorska disertacija pod nazivom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ u potpunosti ispunjava sve zahtevane kriterijume. Kandidat je pokazao izuzetnu sklonost i sposobnost za bavljenje naučno-istraživačkim radom, kao i samostalnost u svim fazama izrade ove disertacije.

5.2. Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos postignutih rezultata Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću TMF-a da prihvati ovaj Izveštaj i da ga zajedno sa podnetom doktorskom disertacijom mr Tatjane Đakov, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom „Poliimidne konzole za primenu u mikro-elektro-mehaničkim sistemima (MEMS)“ da na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, kao i da, nakon završetka procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije, pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 10. 06.2016.

Članovi Komisije:

dr Ivanka Popović, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Ljubinka Rajaković, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Vesna Radojević, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Melina Kalagasidis Krušić, vanredni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Vesna Jović, naučni savetnik
Univerziteta u Beogradu,
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju