

## NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FIZIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Odlukom Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta, na sednici održanoj 26.12.2018. godine u Beogradu, određeni smo za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije kandidata Aleksandra Ćirića, diplomiranog fizičara i studenta doktorskih studija Fizičkog fakulteta, pod nazivom „Judd-Ofelt theory and thermometry of europium doped materials“ iz uže naučne oblasti Primenjena fizika, koju je on predao Fizičkom fakultetu dana 07.12.2018. godine. Na osnovu uvida u doktorsku disertaciju kandidata podnosimo sledeći:

### IZVEŠTAJ

#### 1. Osnovni podaci o kandidatu

##### 1.1. Biografski podaci

Aleksandar Ćirić rođen je 26.05.1983. u Knjaževcu. Osnovnu školu završio je u Knjaževcu, a gimnaziju “HS Marietta” u Marietta, GA, SAD. Godine 2003. upisao je Fizički fakultet u Beogradu, smer Teorijska i eksperimentalna fizika. Diplomirao je na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2015. godine na smeru Teorijska i primenjena fizika, sa temom: “Projektovanje i izrada višekanalnog kontrolera za programibilni LED izvor”. Iste godine upisuje postdiplomske doktorske studije na odseku Fizika, smer Primenjena fizika.

Tokom osnovnih studija Aleksandar je bio zaposlen u *Microsoft Development Center Serbia*, na projektu *Math Input Panel*. Autor je knjiga „Antenna building guide: Blueprints and explanations for HAM and DIY antenna builders for all Bands and uses“ i „A Guide to Monte Carlo and Quantum Monte Carlo methods“. Developer je Linux distribucije *Leenux linux*.

##### 1.2. Naučna aktivnost

Osnovni predmet istraživanja kandidata Aleksandra Ćirića je luminiscencija i termometrija neorganskih materijala i Judd-Ofelt teorija. Ima pet objavljenih radova u međunarodnim časopisima, i još dva rada na recenziji u međunarodnim časopisima.

## **2. Opis predatog rada**

### **2.1. Osnovni podaci**

Doktorska disertacija kandidata urađena je pod rukovodstvom mentora dr Miroslava D. Dramićanina, naučnog savetnika INN "Vinča". Mentor ispunjava uslove Fizičkog fakulteta za rukovođenje izradom doktorske disertacije, jer je u naučnom zvanju i autor je velikog broja radova iz oblasti luminiscentne termometrije, objavljenih u vrhunskim međunarodnim časopisima i predstavljenih na međunarodnim i domaćim konferencijama. Teza je napisana na 180 strana, ne računajući naslovnu stranu, zahvalnice, sažetak, sadržaj, biografiju autora i neophodne izjave, sve u skladu sa uputstvom za oblikovanje doktorske disertacije Univerziteta u Beogradu. Disertacija je podeljena u 6 glava, sadrži 78 slika, od čega je 52 iz literature, dok je 26 slika vlastitih rezultata, i 14 tabela, od čega je 10 iz literature i 4 vlastitih. Navedeno je 173 referenci.

### **2.2. Predmet i cilj rada**

Imajući u vidu da temperaturni senzori predstavljaju čak 80% svih senzora, i da je temperatura jedna od najčešće merenih veličina, ne može se preneglasiti značaj daljeg termometrijskog istraživanja. Od modernih metoda za merenje temperature, semi-invanzivna tehnika, luminiscentna termometrija, privukla je najviše pažnje. Kao senzor, materijali dopirani lantanidima su zbog svojih luminiscentnih karakteristika najbitniji tip fosfora u ovoj, sve popularnijoj, termometrijskoj grani. Progres se može očekivati koliko u razvoju novih materijala sa boljim termometrijskim osobinama koliko i u boljem teorijskom razumevanju temperaturski zavisne luminiscencije.

Od metoda luminiscentne termometrije, zbog svoje jednostavnosti i niske cene opreme, najzastupljeniji je "Luminescence intensity ratio" (LIR) metod, kod kojeg se za očitavanje temperature koristi odnos intenziteta pikova. Na taj način eliminiše se problem zavisnosti od intenziteta ekscitacione lampe.

Semi-empirijska Džad-Ofelt teorija je jedina teorija koja objašnjava fotoluminiscenciju lantanida. Od svog nastanka, teorija predstavlja centralnu tačku spektroskopskih istraživanja trivalentnih elemenata od Ce do Yb. Sama teorija daje mogućnost predviđanja verovatnoća spontanih radijativnih prelaza, poprečne preseke, vremena života, na osnovu samo 3 parametara koji se mogu dobiti iz spektra.

Glavni predmet istraživanja je proširenje Džad-Ofelt-ove teorije u vidu teorijskog modela primenjenog na fenomen luminescentne termometrije (konkretno LIR metoda), sa ciljem predviđanja termometrijskih veličina preko Džad-Ofelt-ovih parametara. Tradicionalni metod za ispitivanje termometrijskih osobina materijala pomoću odnosa intenziteta linija uključuje snimanje spektara na različitim temperaturama i njihovu analizu. Ovaj model ima sposobnost određivanja najboljih elektronskih prelaza za dati materijal, ili za razne materijale, na osnovu spektra snimljenog na sobnoj temperaturi ili Džad-Ofelt-ovih parametara datih u literaturi. Model, isprva kreiran za  $\text{Eu}^{3+}$  dopirane materijale, proširen je na sve materijale dopiranih lantanidima, od prazeodijuma do tulijuma.

Dolaženje do ovog teorijskog modela zahtevalo je ispunjenje određenih uslova za eksperimentalna merenja i teorijska izračunavanja. Za početak, postojala je potreba za uzorcima dopiranim sa  $\text{Eu}^{3+}$ , za šta je korišćena već dobro poznata metoda, plazmena elektrolitička oksidacija. Istraživanje uključuje ispitivanje fotoluminiscencije, morfologije i hemijski sastav uzoraka kreiranih ovom metodom. Kreirani su i ispitani  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  i  $\text{HfO}_2$  dopirani trovalentnim europiumom. Sledeći korak su LIR merenja na datim uzorcima. Za to je bilo potrebno dizajnirati i kreirati aparate za grejanje/hlađenje i praćenja temperature uzorka tokom spektroskopskih merenja. Aparatura se sastoji od ploče za grejanje, ploče za hlađenje, kontrolne/naponske jedinice, i otpornog referentnog termometra. Džad-Ofelt-ova analiza zahteva kompleksna izračunavanja, tako da bi ručno računanje nad podacima sa mnogo testiranih materijala predstavljalo praktičan problem. Rešenje je nađeno u kreiranju softverske aplikacije koja bi mogla da izračuna Džad-Ofelt-ove parametre i izvedene veličine pomoću emisionih spektara  $\text{Eu}^{3+}$  dopiranih materijala. Napisana u Javi, JOES softverska aplikacija je napravljena i testirana na  $\text{TiO}_2:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{ZrO}_2:\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{Eu}^{3+}$  i  $\text{HfO}_2:\text{Eu}^{3+}$ , dopiranim sa više različitih koncentracija europiuma i kreiranih plazmenom elektrolitičkom oksidacijom.

### 2.3. Publikacije

U ovoj doktorskoj disertaciji su predstavljeni rezultati 5 objavljenih radova u časopisima sa impakt faktorom većim od jedan:

1. S. Stojadinović, N. Tadić, **A. Ćirić**, R. Vasilić, Photoluminescence properties of  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{HfO}_2$  coatings formed by plasma electrolytic oxidation of hafnium, *Optical Materials* 77 (2018) 19–24.

2. A. Ćirić, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Luminescence Intensity Ratio thermometry and Judd-Ofelt analysis of  $\text{TiO}_2:\text{Eu}^{3+}$ , *Optical Materials* 85 (2018) 261–266.
3. A. Ćirić, S. Stojadinović, M. Sekulić, M.D. Dramićanin, JOES: An application software for Judd-Ofelt analysis from  $\text{Eu}^{3+}$  emission spectra, *Journal of Luminescence* 205 (2019) 351–356.
4. A. Ćirić, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Judd-Ofelt and chromaticity analysis of hafnia doped with trivalent europium as a potential white LED phosphor, *Optical Materials* 88 (2019) 392-395.
5. A. Ćirić, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Custom-built thermometry apparatus and luminescence intensity ratio thermometry of  $\text{ZrO}_2:\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{Eu}^{3+}$ , *Measurement Science and Technology* in press.

#### 2.4. Pregled naučnih rezultata izloženih u disertaciji

Disertacija je podeljena u 6 glava, od kojih su prve dve uvod i prezentacija do sada poznatih rezultata, dok su treća, četvrta i peta originalni rezultati kandidata. Šesta glava je bibliografija rada.

Prva glava predstavlja uvod u eksperimentalne i teorijske metode korišćene u disertaciji. Započinje kratkim objašnjenjem metode difrakcije X-zraka, zatim uvodi u metod plazmene elektrolitičke oksidacije i do sada objavljenih fotoluminiscentnih merenja, prelazi na uvod u spektroskopske osobine lantanida, metoda za merenje temperature i uvod u luminiscentnu termometriju.

Druga glava se bavi teorijskom osnovom Judd-Ofelt teorije, luminiscentne termometrije, fotoluminiscencije ispitivanih uzoraka i njihovih kristalnih struktura, i spektroskopskim osobinama trovalentnog europijuma. Svi metodi merenja i njihovo poređenje dati su na početku ove celine. Drugi deo se bavi teorijom fotoluminiscencije ispitivanih materijala u zavisnosti od njihove kristalne structure i načina pripreme. Treći deo opisuje kompletno izvođenje Judd-Ofelt teorije, metode parametrizacije i dobijanja izvedenih veličina, uz fizičku interpretaciju Judd-Ofelt-ovih parametara.

Treća glava čini eksperimentalni deo istraživanja. Prva oblast se bavi dobijanjem oksida uzoraka dopiranim europiumom od folija titanijuma, niobijuma, cirkonijuma i hafnijuma. Nakon kratkog opisa aparature za dobijanje XRD, SEM, EDS i PL rezultata, sledi detaljna prezentacija kreirane aparature za hlađenje i grejanje uzoraka. Napravljena aparatura

i sama predstavlja određenu inovaciju zbog višestruko niže cene u poređenju sa komercijalnom opremom istog tipa.

Četvrta glava sadrži rezultate i analize rezultata eksperimentalnih istraživanja, kao i dobijanje teorijskog termometrijskog Džad-Ofelt modela. Započinje morfološkom, hemijskom, faznom i fotoluminiscentnom analizom kreiranih uzoraka. Ove osobine za  $\text{HfO}_2:\text{Eu}^{3+}$  kreiran PEO procesom su po prvi put opisane. Zatim prelazi na rezultate testiranja aparature za grejanje i hlađenje uzoraka, pomoću kojeg su, opisanog u sledećoj oblasti, dobijene LIR vrednosti za date uzorke. Time je ispitana njihova upotrebna vrednost kao temperaturnih senzora. Ova istraživanja predstavljaju prvo ispitivanje uzoraka kreiranih PEO procesom za luminescentnu termometriju. Naredni je opis teorije koja stoji ispod JOES aplikacije za računanje Džad-Ofelt-ovih parametara i izvedenih veličina i prezentacija same aplikacije, uz Džad-Ofelt analizu ispitivanih uzoraka. Sama aplikacija predstavlja kompletnije i preciznije rešenje od postojećih za Džad-Ofelt analizu europijumom dopiranih materijala. Pomoću nje je po prvi put urađena Džad-Ofelt analiza  $\text{HfO}_2:\text{Eu}^{3+}$  materijala, a uopšteno i prve analize materijala kreiranih PEO procesom. Sam kraj glave sa rezultatima istraživanja predstavlja inovativni spoj Džad-Ofelt analize sa luminescentnom termometrijom, uz opis metoda za dobijanje određenih karakteristika materijala na osnovu ova dva tipa merenja i izračunavanja, kao i opis termometrijskog Džad-Ofelt modela, koji se bavi predviđanjem i opisom termometrijskih veličina preko Džad-Ofelt-ovih parametara.

U petoj glavi dat je zaključak rezultata disertacije.

### 3. Spisak publikacija

#### Radovi u međunarodnim časopisima:

1. S. Stojadinović, N. Tadić, **A. Ćirić**, R. Vasilić, Photoluminescence properties of  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{HfO}_2$  coatings formed by plasma electrolytic oxidation of hafnium, *Optical Materials* 77 (2018) 19–24. [M22; IF=2.320 (2017)]
2. **A. Ćirić**, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Luminescence Intensity Ratio thermometry and Judd-Ofelt analysis of  $\text{TiO}_2:\text{Eu}^{3+}$ , *Optical Materials* 85 (2018) 261–266. [M22; IF=2.320 (2017)]

3. A. Ćirić, S. Stojadinović, M. Sekulić, M.D. Dramićanin, JOES: An application software for Judd-Ofelt analysis from  $\text{Eu}^{3+}$  emission spectra, *Journal of Luminescence* 205 (2019) 351–356. [M21; IF=2.732 (2017)]
4. A. Ćirić, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Judd-Ofelt and chromaticity analysis of hafnia doped with trivalent europium as a potential white LED phosphor, *Optical Materials* 88 (2019) 392-395. [M22; IF=2.320 (2017)]
5. A. Ćirić, S. Stojadinović, M.D. Dramićanin, Custom-built thermometry apparatus and luminescence intensity ratio thermometry of  $\text{ZrO}_2:\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{Eu}^{3+}$ , *Measurement Science and Technology* in press. [M22; IF=1.685 (2017)]

#### 4. Provera originalnosti doktorske disertacija

Proverom originalnosti doktorske disertacije Aleksandra Ćirića, sprovedene 07.12.2018 godine od strane Univerzitetske biblioteke Svetozar Marković, Beograd, na osnovu Pravilnika o postupku provere originalnosti doktorskih disertacija koje se brane na Univerzitetu u Beogradu

([http://valtez.rcub.bg.ac.rs/Files/Pravilnik\\_o\\_postupku\\_provere\\_originalnosti-dok\\_disert.pdf](http://valtez.rcub.bg.ac.rs/Files/Pravilnik_o_postupku_provere_originalnosti-dok_disert.pdf)) pomoću programa “iThenticate”, utvrđeno je:

- 5% preklapanja teksta sa radom [10]
- 4% preklapanja teksta sa radom [165]
- 2% preklapanja teksta sa radom [173]
- 1% preklapanja teksta sa radom [33]
- 1% preklapanja teksta sa radom [4]

Svi tekstovi, sa kojim je vršeno poređenje, su dostupni biblioteci (baze svih časopisa sa SCI liste, baze doktorskih disertacija i master teza u svetu i kod nas). Poklapanja su nađena sa uključenim opcijama: “Quotes Excluded” (izostavlja iz provere citirani tekst) i “Bibliography Excluded” (izostavlja iz provere reference). Najveći deo poklapanja sa tekstom se odnosi na reference u kojima je kandidat objavio rezultate svojih istraživanja u toku rada na doktorskoj disertaciji. Preklapanje sa tekstom u kojem kandidat nije koautor, se uglavnom odnosi na matematičke formule koje se javljaju u publikovanim radovima kandidata. Stoga smatramo da je doktorska disertacija Aleksandra Ćirića u potpunosti originalna, kao i da su u potpunosti ispoštovana akademska pravila citiranja i navođenja, te se propisani postupak pripreme za njenu odbranu može nastaviti.

## ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog, Komisija zaključuje da rezultati kandidata Aleksandra Ćirića, prikazani u okviru ove doktorske disertacije predstavljaju značajan i originalan naučni doprinos u oblasti Primenjene fizike. Iz oblasti disertacije kandidat ima 5 objavljenih radova u međunarodnim časopisima. Shodno tome, Komisija pozitivno ocenjuje doktorsku disertaciju kandidata Aleksandra Ćirića pod naslovom:

**„Judd-Ofelt theory and thermometry of europium doped materials“**

i predlaže Nastavno-naučnom veću Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu da prihvati i odobri njenu odbranu.

U Beogradu 22.01.2019. godine

***Dr Miroslav D. Dramićanin***

naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke Vinča.

---

***Dr Stevan Stojadinović***

redovni profesor Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

---

***Dr Ivan Belča***

redovni profesor Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

---