

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU  
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA  
UNIVERZITETA U BEOGRADU

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Salah Salem Musbah

Odlukom br. 35/340 od 26.10.2012. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata. Salah Salem Musbah pod naslovom

Optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana  
(Optical And Mechanical Properties Of Hybrid Nanocomposite Light Guide Fibers)

Posle 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**

11.12.2008.- Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o imenovanju Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije Salah Salem Musbah-a, pod nazivom „Optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana”.

05.02.2009.- Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o prihvatanju Izveštaja Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije i odobrenju izrade doktorske disertacije Salah Salem Musbah-a, pod nazivom „Optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana” Za mentora je određen Dr Radoslav Aleksić.

13.03.2009.- Veće naučnih oblasti tehničkih nauka donosi odluku po kojoj daje saglasnost na predlog teme Salah Salem Musbah-a, pod nazivom „Optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana”.

25.10.2012.- Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta imenovana je Komisija za pregled i ocenu doktorske disertacije u sastavu: dr Radoslav Aleksić, red. prof. TMF, dr Petar Uskoković, red. prof. TMF, dr Vesna Radojević, van. prof. TMF, dr Ljiljana Brajović, docent Gradjevinskog fakulteta u Beogradu.

## 1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove disertacije spadaju u naučnu oblast Hemija i hemijska tehnologija, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Mentor je Dr Radoslav Aleksić, redovni profesor za oblast Hemija i hemijska tehnologija (uža nučna oblast Inženjerstvo materijala).

## 1.2. Biografski podaci o kandidatu

Salah Salem Musbah rođen je 20.9.1965. godine u Janzur-u, Libija. Srednju školu završio je u Tripoliju 1983. godine. Od 1984 do 1988 godine pohađao i diplomirao na Lancashire Politehničkoj školi u Engleskoj a zatim od 1988. do 1991. završio Queen Mary koledž u Engleskoj gde je stekao diplomu inženjera mašinstva. U periodu od 2001. do 2003. godine završio je magistarske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu gde je stekao diplomu magistra tehničkih nauka u oblasti nauke o materijalima i inženjerstva materijala. Pre dolaska na doktorske studije na Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu radio je u Centru za istraživanje i razvoj u Tripoliju, Libija.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### 2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija sadrži sledeća poglavlja: Apstrakt (na srpskom i engleskom jeziku); Uvod; Luminiscentni materijali, Polimerni nanokompoziti za optičke primene, Polimerna optička vlakna, Dinamičko-mehanička analiza polimernih kompozita, Optička i dinamičko-mehanička svojstva polimernih svetlovodnih vlakana, Optička i mehanička svojstva nanokompozita PMMA-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>), Sinteza, karakterizacija i mehanička svojstva nanokompozita na bazi retkih zemalja.; Zaključak; Prilozi i Literatura.

Po svojoj formi i sadržaju, podneti rad zadovoljava sve standarde za doktorsku disertaciju.

### 2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodu istaknut je značaj istraživanja u oblasti nanokompozitnih materijali na bazi oksida aktiviranih jonima lantanida koji imaju veoma značajnu primenu za izradu lasera, laserskih i LED dioda, luminescentnih lampi, displeja, optičkih vlakana, biomedicinskih markera itd. Za primenu posebno su od interesa emisije uskog energetskog opsega, dugo vreme života pobuđenih elektronskih stanja (fosforescencija) i fotohemijska stabilnost. U zavisnosti od načina pobuđivanja, luminescencija se može podeliti na: a) fotoluminescenciju (PL) – posledica apsorpcije elektromagnetnog zračenja, b) elektroluminescencija – posledica apsorpcije električnog polja, c) radioluminescencija – posledica jonizujućeg zračenja, d) katodoluminescencija – posledica interakcije snopa elektrona velike brzine sa tankim slojem fluorescentne supstance, e) hemiluminescencija – posledica pretvaranja hemijske energije u svetlosnu, f) bioluminescencija. Predmet ove doktorske disertacije su luminiscentni materijali. Kada se fosforescentna čestica izloži dejstvu eksitacionog izvora, kao što je

ultraljubičasta (UV) ili vacuum-UV (VUV) svetlost, ona prolazi kroz proces apsorpcije, relaksacije i emisije. Svetlost se apsorbira od strane materijala domaćina i apsorbirana energija se prenosi sa materijala domaćina na aktivator (luminescentni centar). Aktivator na kraju emituje vidljivu svetlost preko mehanizma prenosa energije. Fotoekscitacija na određenoj talasnoj dužini u bliskoj infracrvenoj oblasti koja je praćena luminiscencijom na kraćim talasnim dužinama u vidljivoj svetlosti se naziva prelaz iz bliske infracrvene u vidljivu oblast. To je veoma neobična pojava jer se fotoni niže energije „pretvaraju“ u fotone sa višom energijom. Najmanje dva fotona u infracrvenoj oblasti su potrebna za generisanje jednog fotona u vidljivoj oblasti. Upkonverzija se uglavnom dešava u materijalima u kojima procesi relaksacije više fotona ne dominiraju, što omogućava više od jednog metastabilnog stanja. U jedinjenjima retkih zemalja, elektroni 4f i 5f su efikasno zaštićeni i samim tim nisu značajnije vezani- metal-ligand. Kao posledica toga, spoj elektron-fonon na f-f prelazima se smanjuje, a proces otpuštanja više fonona je manje konkurentan. Fenomen upkonverzije je zbog toga najčešće proučavan na materijalima koji sadrže jone lantanida. Kada neki medijum (na primer laser) emituje fosforescenciju kao posledicu ekscitacije sa upadnom svetlošću, talasna dužina je duža od ekscitovane svetlosti. To znači da se smanjuje energija fotona. Međutim, pod izvesnim okolnostima može doći do upkonverzije fluorescencije gde je talasna dužina emitovane svetlosti kraća. To je moguće putem ekscitacionih mehanizama koji uključuju više od jednog apsorbiranog fotona. Upkonverzija fluorescencije se može potisnuti kada imamo mnogo prelaza fotona, jer oni mogu smanjiti život metastabilnih nivoa. Vlakna sa niskom maksimalnom energijom fotona, kao što su neka fluoridna vlakna, imaju mnogo slabije, više fononske procese, pa stoga i jači upkonverziju.

U drugom poglavlju dat je prikaz luminescentnih materijala. Luminescentni materijali, zvani fosfori konvertuju neki tip energije u elektromagnetno zračenje, najčešće u vidljivoj oblasti, mada se može javiti i u ultraljubičastoj i infracrvenoj oblasti. Ovi materijali su uglavnom neorganska jedinjenja u formi prahova ili tankih filmova, koji sadrže odgovarajuće jone, odnosno aktivatore. Aktivator apsorbira pobuđujuće zračenje, prelazi u pobuđeno stanje, nakon čega se vraća u osnovno stanje na dva konkurentna načina: radijativnom emisijom ili neradijativnim procesima. Da bi fosfor bio efikasan potrebno je neradijativne procese svesti na minimum. Ponekad se u matricu fosfora dodaju i joni koji poboljšavaju luminescenciju na taj način što apsorbiraju zračenje, zatim ga u procesu transfera energije predaju jonu aktivatora koji dalje vrši emisiju. Bitne karakteristike fosfora su spektralna distribucija energije emisije (emisioni spektar) i pobuđivanja (ekscitacioni spektar), kao i odnos brzina radijativnih i neradijativnih prelaza u osnovno stanje. Tipični aktivatori fosfornih materijala su joni retkih zemalja i prelaznih metala, kao i molekularni anjoni, kao što su volframatne i vanadatne grupe. Joni retkih zemalja i prelaznih metala se dodaju u veoma maloj količini, reda veličine nekoliko atomskih procenata, pa je samim tim međusobna interakcija tih jona zanemarljiva. Joni prelaznih metala se formiraju kada se uklone elektroni iz spoljašnjih 4s orbitala neutralnih atoma. Na taj način se formiraju joni 3d konfiguracije, gde su 3d orbitale velikih radijusa i izložene su uticaju okolnih atoma matrice. Joni retkih zemalja se formiraju uklanjanjem 6s elektrona, ostavljajući optički aktivne 4f orbitale unutar popunjenih 5s i 5p ljuski. To znači da su one malog radijusa i da su delom zaštićene od spoljašnjeg uticaja matrice. Zato se može reći da optičke karakteristike jona prelaznih metala umnogome zavise od kristalne strukture matričnog materijala i značajno se razlikuju u odnosu na slobodne jone. Nasuprot tome, joni retkih zemalja zadržavaju slične optičke karakteristike i u kristalnoj rešetki različitih matričnih materijala. Zbog svega navedenog emisioni spektri fosfora dopiranih jonima retkih zemalja se sastoje od uskih, oštih traka, dok fosfori dopirani jonima prelaznih metala daju spektre širokih traka. Itrijum-oksidi su jedan od najznačajnijih materijala u koji se ugrađuju joni retkih zemalja radi dobijanja efikasnih svetlosnih izvora. Posедуje hemijsku i visokotemperaturnu stabilnost

(temperatura topljenja 2430 °C), veliki energetska procep ( $E_g=5,8$  eV) u koji se lako smeštaju osnovni i pobuđeni elektronski nivoi jona retkih zemalja, transparentan je u opsegu talasnih dužina od 280 nm do 8  $\mu$ m i poseduje veliku toplotnu provodnost. Kada je dopiran trovalentnim jonima Eu i Tb efikasno emituje crvenu i zelenu svetlost pod pobudom visokoenergetskog zračenja (gama, X ili ultraljubičasti zraci), dok dopiran dvovalentnim jonima Eu emituje plavu svetlost. U slučaju dopiranja trovalentnim jonima Er, Ho, Nd i Tm moguće je ostvariti emisiju u bliskoj infracrvenoj oblasti. Sa istim jonima moguće je i dobiti emisiju u ultraljubičastoj, plavoj, zelenoj i crvenoj oblasti spektra nakon pobude u bliskom infracrvenom delu spektra. Ova „up-converted“ emisija, odnosno emisija fotona veće energije od energije pobudnih fotona, ima danas primene za izgradnju lasera i detektora zračenja.

U trećem poglavlju dat je literaturni pregled stanja luminiscentnih nanokompozitnih materijala. Mnoge aplikacije luminescentnih materijala zahtevaju visoku čvrstoću i homogenost raspodele aktivatora, kao i čestice nanometarskih dimenzija. Primena nanostrukturnih materijala se zasniva na veoma velikoj specifičnoj površini i činjenici da male čestice nude dodatne mogućnosti za manipulaciju i prostor za dopiranje aktivatorima. Izazovi u vezi sa sintezom luminescentnih nanomaterijala potiču najpre od zahteva za malom veličinom čestica, zatim za uniformnom raspodelom čestica, identičnim oblikom i morfologijom, istim hemijskim sastavom i kristalnom strukturom. Dalje, od izvanredne je važnosti uniformno i homogeno distribuirati aktivne primese u materijalu. Svi ovi zahtevi vode do toga da se traže nove metode sinteze u cilju poboljšanja karakteristika i performansi fosfora. Usled brzog napretka u nanotehnologijama, a posebno zbog razvoja novih metoda za sintezu nanomaterijala, raste interes za istraživanje svojstava i primenu nanostrukturnih materijala dopiranih jonima retkih zemalja. Poseban značaj istraživanjima daje moguća primena za izgradnju visokorezolucioni displeja i bioloških markera. Nanomaterijali imaju mnoga svojstva koja uzrokuju da joni retkih zemalja ugrađeni u njih imaju drugačiju emisiju svetlosti u poređenju sa istim materijalom mikrometarskih dimenzija. Na primer, odnos površine prema zapremini nanočestica je značajno veći nego kod mikrometarskih čestica, pa se veliki broj dopantskih jona nalazi blizu površine. U takvom asimetričnom kristalnom okruženju njihova emisija se razlikuje od emisije iz regularnih kristalografskih položaja. Kvantizirajući efekat se javlja kada su dimenzije čestica iste veličine ili manje od nekih „karakterističnih dužina“ kao što su talasna dužina fonona. Efekti kvantnog konfiniranja menjaju preklapanja talasnih funkcija dopantskih jona i jona materijala u koje su ugrađeni, što često dovodi do mnogo efikasnijih interakcija između tih jona. Na primer, u nanokristalnom  $Gd_2O_3$  ( $Eu^{3+}$ ) efikasnost emisije raste proporcionalno sa kvadratom smanjenja čestice. Nanokristalni monoklinični  $Y_2O_3$  ima duže vreme emisije nego što je primećeno u makro kristalu. Ustanovljeno je da nanočestice imaju veću kvantnu efikasnost emisije, kao i drugačiji odnos boja emitovane svetlosti pri upkonverziji. Osim toga, nove metode sinteze omogućavaju dobijanje specifičnih morfologija čestica (nanocevi, nanodiskovi), kao i „core-shell“ čestica sa unapređenim optičkim svojstvima.

U četvrtom poglavlju dat je literaturni pregled najnovijih modifikacija kod polimernih optičkih vlakana (POV) koji se koriste za izradu svetlovoda. Ključne prednosti POV tehnologije u odnosu na druga kablovska rešenja mreža za pristup sastoji se u jednostavnosti izrade instalacije, kabl ima mali prečnik, malu gustinu, fleksibilan je, potpuno je imun na EMI, otporan je na vlagu, koroziju i prašinu. Rad sa POV vlaknima je potpuno bezbedan, za prenos se može koristiti svetlosni signal u vidljivom spektru koji je bezopasan za vid, a proveru veza je izuzetno jednostavna pošto je signal vidljiv i golim okom. Međutim, da bi POV vlakna zauzela svoje mesto u mrežama za pristup najnovije generacije potreban je dalji rad na: usavršavanje optoelektronskih komponenti primopredajnika za rad pri brzinama od nekoliko Gb/s uz poboljšanje linearnosti, propusnog opsega i pouzdanosti; razvoj lasera i

fotodioda za montažu na štampanim pločicama, pogodnih za višezilne POV kablove; razvoj višezilnih (*ribbon*) POV kablova; razvoj za rukovanje i instalisanje veoma jednostavnih konektora i kablova, čime bi se obezbedila niska cena instalisanja i pružila mogućnost za izradu instalacije po principu uradi sam; proširenje propusnog opsega primenom novih tehnologija i usavršenih modulacionih postupaka. U novije vreme za izradu jezgra POV vlakna koriste se deuterirani PMMA i perfluorirani polimeri, kojima se značajno smanjuje slabljenje i povećava propusni opseg vlakana. Slabljenje deuteriranih polimera povezano je sa samom tehnologijom izrade vlakna, ali je tipično za red veličine manje od slabljenja kod PMMA polimera. Do sada su najbolji rezultati po pitanju slabljenja vlakna postignuti sa materijalom CYTOP (Cyclic Transparent Optical Polymer) sa kojim je ostvareno slabljenje reda 10 dB/km na talasnim dužinama od 1300 nm. Može se očekivati da će vlakna izrađena korišćenjem CYTOP materijala imati slabljenje manje od 1 dB/km. S obzirom da se kod vlakana od perfluoriranih polimera prenos vrši unutar spektra od 650 nm do 1300 nm, sa ovim vlaknima se mogu koristiti komponente razvijene za staklena vlakna koje rade na talasnim dužinama od 850 nm do 1300 nm. Na osnovu izvršenih analiza i prikazanih rezultata može se zaključiti da nova polimerna optička vlakna, pružaju značajne prednosti u odnosu na druge kablovske strukture. Na ovom mestu je potrebno istaći da šira primena optičkih vlakana u realizaciji mreža za pristup i kućnih lokalnih mreža ne isključuje buduću primenu bežičnih tehnologija u ovim segmentima komunikacionog sistema. Bežični prenos, koji se odvija pri brzinama reda 100 Mb/s, ostaje prisutan unutar objekata korisnika, ali se podrazumeva da kičmu ovog sistema čini optička kablovska struktura koja dozvoljava prenos pri brzinama od nekoliko Gb/s.

U petom poglavlju dat je prikaz mogućnosti dinamičko-mehaničke analize (DMA) kod polimernih materijala. DMA je opšti naziv metode za dinamičko-mehaničko deformisanje uzorka i merenje odziva materijala. Deformacija može imati sinusoidnu, stepenastu, konstantnu vremensku zavisnost ili da raste unapred zadatom brzinom. Odziv materijala na deformaciju se može pratiti kao funkcija temperature, ili vremena. Dinamičkom-mehaničkom analizom dobijaju se informacije o: a) mehaničkim svojstvima materijala (moduli absorbovane i izgubljene energije viskoelastičnih materijala tokom vremena i pri različitim temperaturama), b) pomeranja na molekularnom nivou i c) zavisnosti svojstvo-struktura ili morfologija. Mehanička svojstva polimera proističu iz hemijskog sastava polimera (diktira koja od mehaničkih svojstava će se promeniti) i molekularne strukture polimera (diktira način na koji će se promeniti mehanička svojstva). Kod amorfnog polimera imamo nasumičnu rasporelu polimernih lanaca kroz matricu, bez prisustva pravilnih struktura koje srećemo kod kristaliničnih i delimično kristaliničnih polimera. Zbog ove činjenice imamo kretanje molekula amorfnog polimera ispod tačke topljenja takvog kristalita. Sa povećanjem kretanja molekula u amorfnom polimeru, uzorak prolazi od staklaste, kroz gumoliku do tečne faze. Polimer prolazeći kroz različite faze, menja fizička svojstva pa samim tim može se analizirati mogućnost njegove primene. Zbog toga bitno je ispitati na koji način kretanje molekula amorfnog polimera, utiče na njegova fizička svojstva. Ova kretanja molekula zovu se relaksacija. Dinamičko-mehanička analiza daje karakterizaciju sledećih svojstava polimernih materijala: staklasti prelaz, sekundarni prelaz, kristaliničnost, nadmolekulsko strukturno-poprečno povezivanje, fazno razdvajanje (polimerne smeše, kopolimeri .....), kompoziti, starenje (fizičko i hemijsko), vulkanizacija mreža, orijentacija kao i efekte aditiva. Dinamičko-mehanička analiza (DMA) je jedna od najefikasnijih metoda za proučavanje ponašanja plastičnih i polimernih kompozitnih materijala i potencijalno može biti veoma korisna za simulaciju ponašanja polimernih optičkih vlakana (POV) u realnim primenama.

U šestom poglavlju dati su eksperimentalni rezultati istraživanja ponašanja optičkih vlakana pod dinamičkim neizotermnim uslovima odnosno simultano merenje optičkih i

dinamičko-mehaničkih svojstava polimernih optičkih vlakana. Mogućnost istovremenog merenja nekih optičkih svojstava za vreme DMA može značajno da unapredi proučavanje POV, samih ili ugrađenih u neki materijal. U ovom radu je opisano i diskutovano merenje mehaničkih svojstava POV pomoću 'single cantilever' DMA koje je izvršeno istovremeno sa merenjem intenziteta propuštene svetlosti kroz POV. Kako bi se uporedili rezultati DMA koji su dobijeni za pravougaone i cilindrične uzorke od istog materijala, ista vrsta ispitivanja vršena je i na pravougaonim pločicama dobijenim topljenjem POV. U radu je pokazano da promene intenziteta optičkih signala odgovaraju promenama modula sačuvane energije POV za vreme DMA, a da dobijene maksimalne vrednosti optičkih signala označavaju početak procesa prelaza u staklasto stanje u materijalu od koga je napravljeno optičko vlakno.

U sedmom poglavlju dati su rezultati eksperimentalnih istraživanja optičkih i mehaničkih svojstava PMMA-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) nanokompozita. U okviru ovog rada prezentirano je istraživanje procesiranja i karakterizacije nanokompozitnog materijala PMMA-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>). Uzorci sa različitim sadržajem nanofosfora Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopiranog sa Eu-jonima procesirani su u laboratorijskom uređaju za umešavanje termoplastičnih polimera. Ispitivan je uticaj udela nanočestica na optička i dinamičko-mehanička svojstva kompozita. Intenzitet luminiscentnog emisionog spektra kompozita raste sa udelom nanofosfora. Rezultati DMA pokazuju da modul absorbovane energije, modul gubitaka i temperatura transformacije rastu sa povećanjem udela nanočestica. Mikrotvrdoća kompozita takođe raste sa povećanjem udela nanočestica u kompozitu i pokazuje skoro linearnu zavisnost sa temperaturom transformacije ( $T_g$ ).

U osmom poglavlju dati su rezultati istraživanja optičkih i mehaničkih svojstava PMMA-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) nanokompozita. U okviru ovog rada prezentirano je istraživanje procesiranja i karakterizacije nanokompozitnog materijala PMMA-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>). Poseban značaj ovih istraživanja je u tome što je za dobijanje nanokompozita korišćena metoda elektropredanja što prema detaljnom literaturnom pregledu do sada nije objavljeno u literaturi.

U devetom poglavlju dati su zaključci postignutih rezultati istraživanja koji odgovaraju zadatim ciljevima disertacije. Na kraju je dat spisak korišćene literature.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Ova doktorska disertacija imala je za cilj da istraži mogućnosti dobijanje hibridnih nanokompozita u formi optičkih vlakana kao potencijalnih izvora svetlosti na bazi itrijum-oksida dopiranog jonima retkih zemalja sa poboljšanim luminescentnim svojstvima u odnosu na slične sisteme prikazane u literaturi. Primenljivost materijala za izgradnju fotoelektronskih naprava biće sagledana iz aspekata ekonomičnosti sinteze, kao i luminescentnih i morfoloških svojstava. Pronađene su originalne metode za dobijanje nanokompozitnih optičkih vlakana primenom metode elektropredanja.

Važan aspekt ove disertacije su utvrđene korelacije strukturnih, morfoloških i luminescentnih svojstava prahova itrijum-oksida i gadolinijum-oksida dopiranog jonima erbijuma. Rezultati ovih korelacija omogućavaju dobijanje materijala sa ciljanim svojstvima, kao i mogućnost dizajniranja složenijih svetlosnih izvora, poput izvora bele svetlosti, kao i mogućnost dizajniranja složenijih luminescentnih optičkih vlakana. Ugradnjom jona retkih zemalja u nanostrukturni materijal može se ostvariti intenzivnija emisija, veća kvantna efikasnost i poboljšanje vremena života. Boja emitovane svetlosti može se menjati izborom dopanata na bazi jona retkih zemalja. Intenzitet emitovane svetlosti i vreme života emisije zavise od koncentracije dopanata.

### 3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Pri izradi doktorske disertacije kandidat je koristio veliki broj publikovanih naučnih radova iz oblasti: luminiscentnih prahova, polimernih nanokompozita, polimernih optičkih vlakana, dinamičko-mehaničke analize polimera, transmisijih karakteristika optičkih vlakana, nanoindentacije kompozitnih filmova, metoda dobijanja nano i mikro polimernih vlakana i savremenih metoda za karakterizaciju, termičkih, optičkih i mehaničkih svojstava kompozita. U okviru disertacije dat je potpun kritički literaturni pregled po pojedinim poglavljima fenomena koji su istraživani kao i poređenja dobijenih rezultata sa slično publikovanim rezultatima.

### 3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Pri izradi disertacije korišćene su najsavremenije metode za karakterizaciju materijala u svim fazama eksperimentalnih istraživanja. Disperzija, stepen deaglomeracije kao i mikrografije polaznih i modifikovanih nanočestica ispitani su korišćenjem transmisijne elektronske mikroskopije (TEM). Proces površinske modifikacije nanočestica praćen je metodom infracrvene spektroskopije (FTIR). Morfologija, raspodela i veličina nanočestica u polimernom kompozitu određena je metodom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Termička karakterizacija dobijenih nanokompozita urađena je primenom metoda diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC). Uticaj udela ojačanja kao i jačina veze ojačanje-polimer za različite temperature i frekvencije dinamičkih naprezanja usputan je primenom dinamičko-mehaničke analize (DMA). Karakteristike nanomodifikovanih filmova urađene su primenom metode nanoindentacije. Kvalitet i određenje faznog sastava nano prahova urađena su difrakcijom X-zraka (XRD), morfološke i hemijske karakteristike prahova određena su korišćenjem skenirajuće i transmisijne elektronske mikroskopije (SEM/EDS, TEM/EDS), optička svojstva analizirana su vidljivom i infracrvenom spektroskopijom. Funkcionalna karakterizacija određena je fotoluminescentnim ispitivanjima koja su obuhvatila emisijne spektre, „up“-konvertorske emisijne spektre i određivanje vremena života emisije.

### 3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Postupci sinteze nanokompozita i dobijanje vlakana, filmova i pločica kao i rezultati ispitivanja dobijenih materijala predstavljaju dobru osnovu za razvoj optičkih materijala za različite primene.

Razvoj novih tehnologija korišćenja Sunčeve energije je od globalnog značaja za koncept energetske efikasnosti i održivog razvoja. U poslednjih nekoliko godina snopovi optičkih vlakana doživljavaju svoju renesansu u pogledu primene za prenos Sunčeve svetlosti i osvetljavanje radnih prostorija. Savremena naučna dostignuća i stečena iskustva na polju tehnologije korišćenja Sunčeve energije pokazala su da se solarna energija može koristiti u transformisanom obliku koji može uspešno zameniti korišćenje klasičnih oblika energije. Iz faze eksperimentalnog korišćenja solarne energije mnoge privredno razvijene zemlje u svetu su prešle na masovno korišćenje solarne energije (aktivno i pasivno), naročito u zadovoljenju potreba stanovništva i privrede u hibridnom osvetljavanju stambenih i poslovnih prostorija. Ključna komponenta u ovim sistemima je svetlovodni kabl koji je predmet stalnih istraživanja i inovacija.

### 3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat je potuno osposobljen da samostalno i kritički napravi literaturni pregled publikovanih radova u oblasti koje pokriva disertacija. Spobnost kandidata da samostalno realizuje eksperimentalni istraživački rad i samostalno predstavi dobijene rezultate je prihvatljiva.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### 4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Doprinos rezultata ove teze može se posmatrati sa stanovišta poboljšane modifikacije površina nanočestica kao i dobijanja nanokompozita sa znatno poboljšanim optičkim, termičkim, dinamičko-mehaničkim i nanomehaničkim svojstvima u poređenju sa do sada objavljenim rezultatima. Analiza raspodele veličina deaglomerisanih nanočestica kao i mikrostrukturna analiza pokazuju da je primena navedene metode dovela do visokog stepena deaglomeracije nanočestica. Takođe primena ove metode dovela je i do povećanja količine kovalentno vezanih silana kao kuplujućih agenasa i stepena pokrivenosti površine sa većim udelom hemisorbovanih silana.

Posebni naučni doprinosi ove doktorske disertacije su:

- Razvoj metode simultanog merenja transmisionih i viskoelastičnih svojstava polimernih optičkih vlakana pod neizotermnim uslovima u vidljivom delu spektra, što do sada nije publikovano u referentnoj literaturi;
- Razvijen je metod elektropredenja za dobijanja hibridnih nano i mikro kompozitnih vlakana na bazi itrijum-oksida i gadolinijum oksida dopiranog jonima retkih zemalja sa poboljšanim luminescentnim svojstvima za nove primene ovih materijala, poput luminescentne termometrije;
- Eksperimentalna istraživanje uticaja procesnih uslova brizganja i toplog presovanja hibridnih kompozita PMMA-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) i PMMA-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) sa različitim udelom modifikovanih nanočestica na njihova optička i dinamičko-mehanička svojstva (modul sačuvane i izgubljene energije i tangens gubitaka).
- Razvoj laboratorijske metode dobijanja polimernih vlakana i filmova sa željenim luminescentnim optičkim svojstvima.

### 4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije pripada oblasti funkcionalnih nanokompozitnih materijala i nanotehnogija. Posebno su intenzivna istraživanja u oblasti polimernih optičkih nanokompozita koji su predmet disertacije gde tradicionalno slabe strane polimera (niske vrednosti parametara mehaničke čvrstoće i loša termostabilnost) se značajno poboljšavaju primenom malog udela nano punioca i ojačanja uz neznatan porast gustine. Posebno su detaljno istražene mogućnosti poboljšanja optičkih transmisionih svojstava polimernih vlakana u smislu modifikacija nanočesticama kako bi se dobile mogućnosti njihove primene i izvan vidljivog dela spektra. Da bi se ovi ciljevi realizovali bilo je neophodno razviti metode procesiranja nanokompozitnih optičkih vlakana i filmova nanočesticama kao i razviti metodu simultanog merenja optičkih i termo-mehaničkih karakteristika polimernih optičkih vlakana.

#### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Iz disertacije su do sada objavljena dva rada: jedan u vrhunskom međunarodnom časopisu M21 i dva rada u međunarodnom časopisu M23, kao i pet saopštenja na skupu međunarodnog značaja štampano u izvodu, M34.

##### **M21 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu**

1. **S.S. Musbah**, V. Radojević, I. Radović, P.S. Uskoković, D.B. Stojanović, M. Dramićanin, R. Aleksić "Preparation, characterization and mechanical properties of rare-earth-based nanocomposites", J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 48 (2) B (2012) 309-318. ISSN: 1450-5339 (IF 2011: 1,317, Metallurgy & Metallurgical Engineering 14/74 ).

##### **M23 Rad u međunarodnom časopisu**

1. **S.S. Musbah**, Lj. M. Brajovic, Simultaneous measurement of optical and dynamic mechanical properties of plastic optical fibers, Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 16 (4) 309–317 (2010). ISSN: 1451-9372. (IF 2011: 0,610, Engineering, Chemical 91/133).
2. **S.S. Musbah**, V. Radojević, N. Borna, D. Stojanović, M. Dramićanin, A. Marinković, R. Aleksić, PMMA–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) nanocomposites: optical and mechanical properties, J. Serb. Chem. Soc. 76 (8) (2011) 1153–1161. ISSN: 0352-5139 ( IF 2011: 0, 879, Chemistry, Multidisciplinary 102/152). *Ovaj rad je citiran 4 puta.*

##### **M34 Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu**

2. **S.S. Musbah**, V. Radojević, P.S. Uskoković, D. Stojanović, M. Dramićanin, L. Brajović, R. Aleksić, Dynamic-mechanical and optical properties of PMMA-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eu<sup>3+</sup>) nanocomposites, 2nd International Conference on Physics of Optical Materials and Devices ICOM 2009, Herceg-Novi, Montenegro, August 26<sup>th</sup>–29<sup>th</sup> 2009, The Book of Abstracts p.189.
3. **S.S. Musbah**, V. Radojević, P.S. Uskoković, D. Stojanović, M. Dramićanin, L. Brajović, R. Aleksić, Polymer nanocomposites for optical applications, Eleventh Annual Conference YUCOMAT 2009, Herceg-Novi, Montenegro, August 31–September 4, 2009, The Book of Abstracts, p. 178. Book of Abstracts p.189. <http://www.mrs-serbia.org.rs/images/Yucomat2009-Book-of-abstracts.pdf>
4. **S. S. Musbah**, V. Radojević, P. Uskoković, D. Stojanović, M. Dramićanin, J. Lamovec, R. Aleksić, Nanocomposites For Polymer Optical Waveguides, International Workshop on Processing of Nanostructured Ceramics, Polymers, and Composite, Belgrade 2010, The Book of Abstracts p. 71 (2010). ISBN 867401270-3.
5. I. Radović, **S. S. Musbah**, D. Stojanović, M. Zrilić, N. Romčević, V. Radojević, R. Aleksić, Processing and characterization of composite poly (methylmethacrylate)-bismuth-silicon-oxide, Thirteenth Annual Conference YUCOMAT 2011, Herceg-Novi, Montenegro, September 5-9, 2011. The Book of Abstracts, p. 124. <http://www.mrs-serbia.org.rs/images/Yucomat2011-Book-of-abstracts.pdf>
6. I. Radovic, **S.S. Musbah**, V. Radojevic, D. Stojanovic, M. Zrilic, S. Nikolic, D. Sevic and R. Aleksic, Scintillating composite material, poly (methylmethacrylate)-bismuth-silicon-oxide, 2nd International Workshop, University of Belgrade Faculty of

## **5. ZAKLJUČAK I PREDLOG**

Rezultati istraživanja u okviru doktorske disertacije Salah Salem Musbah-a doprinose povećanju nivoa znanja o strukturi i svojstvima hibridnih nanokompozitnih materijala i mogućnostima poboljšanja polimernih optičkih vlakana dizajniranjem struktura kontrolisanog oblika i veličine na nanometarskoj skali. Ispitani su uslovi silanizacije nanoprahova itrijum-oksida i gadolinijum oksida dopiranih sa europijumom, i uslovi njihove ugradnje u poli (metil metaakrilat).

Pregledom doktorske disertacije, Komisija je konstatovala da podneta doktorska disertacija ima sve neophodne sadržaje i da je napisana u skladu sa uobičajenim standardima. Izloženi materijal je sistematizovan i dobro organizovan. Predmet i ciljevi istraživanja su jasno navedeni, ostvareni rezultati i doprinos istraživanja su verifikovani kroz odgovarajući broj naučnih publikacija.

### **5.2. Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću**

Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se primenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Takođe je konstatovano da doktorska disertacija predstavlja originalni naučni doprinos u oblasti Hemija i hemijska tehnologija u okviru teme optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana. Imajući u vidu kvalitet i obim ostvarenih rezultata, kao i njihov naučni doprinos, Komisija predlaže Nastavno-naučnom Veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da se doktorska disertacija Salah Salem Musbah-a. pod nazivom „Optička i mehanička svojstva hibridnih nanokompozitnih svetlovodnih vlakana”, prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu

U Beogradu, 21. 01. 2013.

### **ČLANOVI KOMISIJE:**

1. Prof. Dr Radoslav Aleksić,  
Tehnološko-metalurški fakultet  
Univerzitet u Beogradu
2. Prof. Dr Petar Uskoković,  
Tehnološko-metalurški fakultet  
Univerzitet u Beogradu
3. Prof. Dr Vesna Radojević,  
Tehnološko-metalurški fakultet  
Univerzitet u Beogradu
4. Dr Ljiljana Brajović, docent,  
Građevinski fakultet  
Univerzitet u Beogradu