

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Невене Раичевић

Одлуком 5056/08-3 бр. од 24. 03.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Невене Раичевић под насловом

„Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња је тему под насловом “Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља” пријавила 30.06.2013. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на 784. седници одржаној 11.07.2013. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Јелена Радовановић, ванредни професор, др Јована Петровић, виши научни сарадник Института за нуклеарне науке Винча, др Витомир Милановић, професор емеритус, др Пеђа Михаиловић, ванредни професор. Извештај Комисије је усвојен на Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду 03.09.2013. године, а Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност за прихватање теме 16.09.2013. године. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду. Кандидаткиња је урађену дисертацију поднела на преглед и оцену 04.03.2015. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 10.03.2015. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Јелена Радовановић, ванредни професор, др Витомир Милановић, професор емеритус, др Јована Петровић, виши научни сарадник, др Пеђа Михаиловић, ванредни професор и др Александра Малуцков, научни саветник Института за нуклеарне науке Винча.

1.2. Научна област дисертације

Предмет дисертације су интегрисани оптички сензори концентрације гасова и течности са применама у заштити животне средине и биомедицини. Они припадају модерној научној области фотоника и то дисциплинама интегрисане и нанооптике. Циљ интегрисане оптике је конструкција компактних оптичких направа које воде светлост кроз таласоводе на чипу уместо кроз слободан простор. Нанооптика се бави проучавањем понашања светлости на нанометарској скали и интеракцијом нанообјеката са светлошћу. Интеграцијом наноструктура (танких филмова, квантних тачака, квантних јама и других) са оптичким чиповима отварају се многобројне могућности за конструкцију извора, модулятора, оптичких логичких кола, меморија и сензора. Ова дисертација се бави интегрисаним оптичким сензорима на бази танких порозних филмова. Основне методе коришћене у тези су нумеричко моделовање интегрисаних оптичких направа и експериментална карактеризација танких филмова.

Ментор дисертације је проф. др Јелена Радовановић која има богато истраживачко искуство у области оптичких наноструктура и у нумеричком моделовању. До сада је објавила 75 радова у међународним часописима са SCI листе и више десетина радова у зборницима радова међународних конференција.

Експерименталне резултате представљене у тези кандидаткиња је добила радећи у групи Проф. Детлефа Кипа на Универзитету Хелмут-Шмит у Хамбургу, што је правилно назначено у тези.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидаткиња Невена Раичевић је рођена 05.01.1985. године у Београду. Основну и средњу школу је завршила у Београду, након чега је уписала Електротехнички факултет Универзитета у Београду 2003. године, где је дипломирала 2007. године на одсеку за Физичку електронику са просечном оценом 8.29 одбраном дипломског рада са темом "Унутарзонска резонантна генерација виших хармоника у квантним јамама". Исте године уписала је и дипломске академске (мастер) студије на Групи за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, које је завршила 2009. године са просечном оценом 9.71. одбраном мастер рада са темом "Утицај напрезања на спин-орбитну интеракцију у полупроводничким наноструктурама". Од 2009. године је запослена као истраживач приправник у Институту за нуклеарне науке "Винча", у лабораторији за атомску физику, при чему је 2010. године унапређена у звање истраживач сарадник. Један период докторских студија (2010-2012.) провела је радећи на "Хелмут Шмит" Универзитету у Хамбургу.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 118 страна куцаног текста и садржи 48 слика. Садржи насловну страну, изразе захвалности, кратак резиме рада на српском и енглеском језику, садржај, шест глава и списак коришћене литературе, који обухвата 159 библиографских референци. Поглавља су насловљена: 1. Увод, 2. Фабрикација и карактеризација танких филмова, 3. Математички модел сензора са танким порозним филмом, 4. Сензор гаса на бази еванесцентног поља са танким TiO_2 порозним филмом, 5. Сензори концентрације течности на бази еванесцентног поља и 6. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводу је представљен принцип рада сензора на бази еванесцентног поља и дат је преглед сензора овог типа који се користе у пракси. Објашњена је разлика у принципу мерења концентрација гасова и течности. Код гасова се мери резонантна апсорпција поља, а код течности модулација фазе сигнала услед промене индекса преламања таласовода у присуству течности. Констатоване су предности и мане постојећих сензора и јасно назначена стратегија за побољшање сензитивности проучавана у овој тези. Како се она заснива на употреби порозног филма, посебна секција у уводу посвећена је утицају порозности на вођене модове и тиме на излазни сигнал сензора. На крају увода дат је преглед структуре дисертације и јасно изложен допринос кандидаткиње.

У глави 2 описани су експерименти са циљем фабрикације и карактеризације танких порозних филмова титанијум диоксида. Дат је преглед познатих метода и детаљно су описане методе коришћене у дисертацији. Филмови су наношени сол-гел техником, а затим третиран на високој температури. Проучаване су њихове микроскопске и макроскопске карактеристике. Величине кристалних зрна и наночесица мерене су дифракцијом икс зрака и скенирајућим електронским микроскопом, респективно. Структура површине филма проучавана је микроскопом атомских сила и методом спрезања помоћу призме. Затим су проучаване макроскопске карактеристике филмова релевантне за њихове примене у оптици: дебљина (профилometriјом и спектрометријом), индекса преламања (спрезањем помоћу призме и спектрометријом). Енергетски процеп филма одређен је комбинацијом мерења величине зрна и трансмисионог спектра. Карактеристике филмова проучаване су у зависности од температуре загревања филма током постпроцесирања.

У глави 3 изложен је математички модел сензора са танким филмом. Разматрано је више модела порозног филма и изабран модел који се најбоље слаже са експерименталним резултатима, Лоренц-Лоренцов модел. Таласоводи су моделовани на стандардан начин, изведене се дисперзионе релације за релевантне трослојне и петослојне таласоводе, и изложене су нумеричке методе решавања таласне једначине. Представљен је и додатак моделу којим се узимају у обзир несавршености танког филма.

Глава 4 бави се сензором концентрације гаса на бази резонантне апсорпције. Показано је да промене параметара танког филма, порозности и дебљине, знатно утичу на сензитивност сензора. На основу тога предложен је оптималан дизајн сензора концентрације угљен-диоксида. Посебно је интересантан закључак да се употребом порозног уместо непорозног филма, осетљивост сензора може повећати и до 20 пута.

У глави 5 представљена је детаљна теоријска анализа сензора индекса преламања течности. Као и у случају сензора гасова, избор параметара сензора заснива се на типичним таласоводним оптичким структурама и експерименталним резултатима добијеним у глави 2 ове тезе. Сензор је постављен у тест грану Мах-Зендеровог интерферометра која је посматрана и као посебна грана и као део мултимодног таласовода. Постављен је модел по којем је одређен одзив интерферометра на промене индекса преламања средине, као и његова зависност од параметара филма. Утврђено је који су параметри погодни за водене растворе, а који за алкохолне растворе и уља. Упоредо са моделом прорачуна осетљивости преко нагиба интерферометарског сигнала, уведен је модел рачунања осетљивости помоћу Фишерове информације и Крамер-Раове неједнакости. Показано је добро слагање ових модела. Модел уведен у овој тези омогућава процену сензитивности интерферометра аналоган приступу у квантној оптици, те тиме омогућава јединствен опис Мах-Зендеровог интерферометра у обе дисциплине. Показано је да се предложеном конфигурацијом може постићи осетљивост од 10^{-5} RIU, што је у складу са резултатима експеримената пријављеним у литератури.

У последњој глави сумирани су закључци и наведене могуће примене предложених сензора и модела рачунања сензитивности.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Велики део мерења у биомедицини, индустрији, пољопривреди и заштити животне средине заснива се на могућности мерења малих промена концентрација течности и гасова. Захтеви за брзим, бесконтактним мерењима и малом величином сензора, али и брз развој фотоничних технологија, избацили су интегрисане и фибер оптичке сензоре у први план. Томе је посебно допринео развој релативно јефтиних техника обраде оптичких материјала ултрабрзим ласерима које омогућавају фабрикацију геометријски захтевних структура, на пример фибер-оптичких решетки и лабораторије на чипу. Док су фибер-оптички сензори погодни за мерења на даљину, лабораторијске (био)хемијске анализе фаворизују компактне интегрисане сензоре. О значају и актуелности ових мерења и развоја одговарајућих уређаја сведочи и чињеница да ЕУ издваја више милијарди евра за фотонику у оквиру програма Хоризонт 2020.

Промена парадигме израде оптичких сензора, из слободног простора у оптичке материјале, захтевала је промену начина мерења. Еванесцентно поље интегрисаних таласовода искоришћено је као медијатор у интеракцији околне супстанце са светлошћу која се простире кроз таласовод, и тиме добијен сензор спољашњег индекса преламања. Притом се испоставило да су мала дужина интеракције ограничена дужином оптичког чипа и мало преклапање вођеног поља са флуидом ограничено дужином пенетрације еванесцентног поља, основна препрека широј употреби ових сензора. Као механизми за повећање осетљивости испитивани су резонатори, мултимодне конфигурације, оптичке решетке, микрорезонаторски дискови и површински плазмони који су и дали најбоље практичне резултате достижући резолуцију од 10^{-6} RIU.

У овој тези предожен је другачији начин за повећање осетљивости сензора на бази еванесцентног поља, наношењем танког порозног филма на површину сензора. Основна идеја је да се порозношћу омогући продор флуида у сам филм и тиме повећа област интеракције поља са флуидом.

У тези је спроведена свеобухватна студија особина порозних танких филмова и процена утицаја порозности на сензитивност оптичких таласоводних сензора. Резултати и закључци потврђују функционалност порозног филма и дају конкретне параметере филма њима постигнуте осетљивости сензора, те тиме доприносе унапређењу постојећих и развоју нових сензора.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидаткиња је детаљно истражила постојећу релевантну литературу и коректно навела радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је укупно 159 библиографских референци. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику истражену у дисертацији, као и радове чији је аутор или коаутор кандидаткиња.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру приложене докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је проучена литература о сензорима на бази еванесцентног поља, уочене њихове предности и недостаци на основу чега је предложено увођење танких филмова као могућег побољшања и тиме дефинисана тематика дисертације.
- Дат је преглед литературе о фабрикацији и карактеризацији танких филмова, а посебно су објашњене методе коришћене у експерименталном раду у оквиру дисертације као и њихове предности и недостаци.
- Филмови су фабриковани стандардном сол-гел методом и третирани загревањем
- Величине кристалних зрна и наночесица филма мерене су дифракцијом икс зрака и скенирајућим електронским микроскопом, респективно.
- Структура површине филма проучавана је микроскопом атомских сила и методом спрезања помоћу призме.
- Дебљина филма је мерена профилометријом и спектрометријом.
- Индекс преламања одређен је спрезањем помоћу призме и спектрометријом.
- Енергетски процеп филма одређен је комбинацијом мерења величине зрна дифракцијом и трансмисионог спектра.
- Сензор је моделован као вишеслојни таласовод. Својствена анализа урађена је и аналитички и нумерички. Притом је коришћена прецизна и ефикасна метода коначних разлика.
- За прорачуне је коришћен софтвер MATLAB (TheMathworks, Inc.), а за карактеризацију филма софтвер SPEKTRUM (LZH Hannover, Germany).
- Уведен је нови модел за израчунавање осетљивости сензора преко Фишерове информације. Валидност модела потврђена је поређењем са стандардном дефиницијом осетљивости.
- Резултати су посматрани критички и добијене вредности осетљивости сензора упоређене су са актуелним вредностима из литературе. Донети закључци су адекватни.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научноистраживачког рада и довела је до решења проблема дефинисаних на почетку дисертације. Предложена решења су заснована на реалним параметрима добијеним у експерименту, адекватно образложена и дискутована.

3.4. Применљивост остварених резултата

У дисертацији је предложена примена танких порозних филмова у сензорима на бази еванесцентног поља. Могућности фабрикације порозних филмова и контроле њихових параметара испитане су експериментално. Резултати карактеризације филмова употребљени су као улазни параметри у симулацијама. Остали параметри таласоводне структуре су стандардни. Овим је обезбеђено да су сви сензори предложени у тези остварљиви у пракси. Разматран је и утицај малих варијација параметара услед неидеалне фабрикације и квантификоване су вредности ових варијација које угрожавају добро функционисање сензора. Показано је да се употребом порозних филмова може повећати сензитивност сензора и до 20 пута, што је резултат од великог практичног значаја. Оптимизацијом предложених сензора индекса преламања процењено је да се могу постићи сензитивности реда величине 10^{-6} које би ове сензоре сврстале међу најосетљивије оптичке сензоре.

Модел израчунавања осетљивости класичног интерферометра преко Фишерове информације предложен у тези може се применити и на друге оптичке сензоре, нпр. на бази оптичких решетки. Он је посебно користан у поређењу перформанси сензора када му се на улаз доводе и класична и квантна светлост.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је у дисертацији показала способност да научни проблем сагледа са више аспеката и да се једнако систематично посвети и експерименталном и теоријском раду, као и да правилно процени релевантност добијених резултата. Овладала је научноистраживачком методологијом и испољила иницијативу за самостално проналажење и решавање проблема. Оспособила се за самостални рад и за рад у истраживачком тиму. Током рада на докторату научила је да јасно изложи и дискутује своје и туђе резултате.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У тези се издвајају четири главна научна доприноса:

- 1) Спроведена је свеобухватна студија морфологије и оптичких особина порозних танких филмова од TiO_2 ; загревање после фабрикације истражено је као начин контроле ових параметара. Показано је да се једноставном и економичном сол-гел техником могу произвести обе фазе TiO_2 , анатас и рутил, као и да се његова порозност може контролисати загревањем. На основу поређења са резултатима мерења, закључено је да Лоренц-Лоренцов модел најбоље моделује зависност индекса преламања од порозности филма. Детаљним мерењима структуре филма објашњен је утицај температуре на величину и распоред градивних честица, чиме су објашњене и промене макроскопских особина филма.
- 2) Предложена је конфигурација сензора концентрације гасова на бази таласовода са порозним танким филмом и предложен конкретан сензор концентрације CO_2 . Показано је да мале промене порозности филма битно утичу на профил вођеног мода и тиме на осетљивост сензора. Добијено је да се применом филма оптималне порозности осетљивост сензора може повећати 20 пута у односу на сензор са непорозним филмом.
- 3) Мах-Зендеров интерферометар са сензором на бази порозног танког филма у тест грани предложен је као сензор индекса преламања течности. Израчунати су интерферограми за различите дебљине и порозности филма, на основу којих је утврђена зависност осетљивости и опсега сензора од ових параметара филма. Показано је да се за оптималне параметре филма може постићи осетљивост реда величине 10^{-6} RIU , што је упоредиво са сензорима на бази површинских плазмона.
- 4) Постављен је математички модел процене осетљивости класичног оптичког сензора помоћу Фишерове информације. Модел је примењен на Мах-Зендеров интерферометар. Добијено је добро слагање осетљивости рачунате преко нагиба излазне карактеристике сензора и Крамер-Раове граничне вредности и тиме доказана валидност предложеног модела. Затим је овај модел искоришћен за оптимизацију сензора индекса преламања течности и дизајн мерача дебљине филма.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Доприносом 1) повезане су микро- и макроскопске особине танког порозног филма и утврђено је који модел је најпогоднији за израчунавање индекса преламања таквог филма (Лоренц-Лоренцов). Показано је да се постпроцесирањем на високим температурама могу

контролисати и фазе кристала и параметри филма. Ови квантитативни резултати корисни су за све области у којима се примењују TiO_2 танки филмови укључујући фотонику. (Референца M21-1)).

Сензори наведени као доприноси 2) и 3) указују на потенцијал порозних филмова у оваквим сензорима и, заједно са одговарајућим експерименталним студијама других аутора наведеним у тези, представљају значајан корак ка повећању осетљивости интегрисаних сензора концентрације флуида. (Референце M21-2), M22-3)).

Допринос 4) је у оригиналној примени Фишерове информације у класичној оптици. Овај модел представља нов начин дизајна оптичких сензора, отвара нова врата ка дизајну вишепараметарских сензора и показује да је Крамер-Раова релација универзалан начин да се одреди осетљивост са класичном и квантном светлошћу, чиме се омогућава њихово лакше поређење. (Референца M21-2))

Научни доприноси ове тезе потврђени су позитивним рецензијама и објављивањем резултата у међународним научним часописима са SCI листе.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације Невена Раичевић је као аутор или коаутор објавила три рада у међународним часописима са SCI листе и то 2 рада у врхунском часопису категорије M21 и 1 рад у часопису категорије M22, као и један раду у међународном часопису без импакт фактора. Резултати су изложени или прихваћени за излагање на 5 међународних конференција од којих је на 3 излагач кандидат лично, као и на једној домаћој конференцији. Од укупног броја радова у међународним часописима кандидат је првопотписани аутор 2 рада у часописима са импакт фактором, једног из категорије M21 и једног из категорије M22.

Категорија M21:

- 1) Matthias, A., **Raicevic N.**, TchanaR. D., Kip D., DeubenerJ., Density dependence of refractive index of nanoparticle-derived titania films on glass, Thin Solid Films 558, 86–92, 2014(**IF=1.867**) (ISSN 0040-6090)
doi: 10.1016/j.tsf.2014.02.078
- 2) **Raicevic, N.**, Maluckov,A., Petrovic, J., Theoretical Analysis of Mach-Zehnder Interferometer with a Porous-Film Waveguide, прихваћен за објављивање у Journal of Optics 2015 (**IF=2.010**) (ISSN2040-8978)

Катергорија M22:

- 3) **Raicevic, N.**, Maluckov, A., Petrovic, J., Evanescent-wave optical gas sensor with a porous thin-film coating, Physica Scripta, T162, 014037, 2014(**IF=1.296**) (ISSN 0031-8949)
doi:10.1088/0031-8949/2014/T162/014037

Међународни часопис без импакт фактора:

- 4) **Raicevic, N.**, Maluckov, A., Petrovic, J., Multimode sensor of fluids based on a porous thin film, Optofluidics, Microfluidics and Nanofluidics Journal 1, 4955, 2014 (ISSN 1613-4982)
doi: 10.2478/optof-2014-0006

Категорија M34:

- 1) **Raicevic, N.**, Maluckov, A., Petrovic, J., Optimization of an Integrated Mach-Zehnder interferometer using the Fisher Information, XXIII International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling OWTNM, Day 2: Poster 22, London, United Kingdom, 2015
- 2) Petrovic, J., Petrovic, M., **Raicevic N.**, Hadzievski, Lj. Development of optical fibre-grating sensors for medical applications and evanescent field sensors of fluid concentration, COST Action MP 1205 Advances in Optofluidics, General Meeting, Book of Abstracts p. 29, Dublin, Ireland, 2014
- 3) **Raicevic, N.**, Maluckov, A., Petrovic, J., Optical sensors based on resonant absorption and surface plasmon resonance, 11th Mediterranean Workshop and Topical Meeting on Novel Optical Materials and Applications - NOMA, Book of Abstracts p. 161, Cetraro, Italy, 2013
- 4) Matthias, A., **Raicevic, N.**, Donfeu Tchana R., Schultz C., Deubener J., Kip D., The use of Swanpoel-Method for characterization of sol-gel derived film, 11th ESG conference, Maastricht, The Netherlands, 2012
- 5) **Raičević, N.**, Matthias, A., Kip, D., Deubener, J. Evanescent field fiber-optics gas sensor using high index sol-gel nanoporous layer, Photonica2011 – III International School and Conference on Photonics, Book of Abstracts p. 135, Belgrade, Serbia, 2011

Категорија M64:

- 1) Petrovic, J., **Raicevic, N.**, Petrovic, M., Maluckov, A., Characterization of Optical Sensors Using Fisher Information, 8. radionica Fotonike, Zbornik apstrakata p. 14, Kopaonik, Srbija, 2015

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација кандидаткиње Невене Раичевић, под насловом „Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља“ представља савремен и оригиналан научни допринос. Дисертација унапређује познавање механизма контроле морфологије и оптичких особина танких порозних филмова TiO_2 током наношења сол-гел техником, као и моделовања њиховог индекса преламања. У дисертацији се детаљно испитује утицај порозности филма на осетљивост сензора концентрације флуида и утврђује вишеструко повећање осетљивости. Битан допринос тезе је и постављање модела за процену осетљивости класичног оптичког сензора заснованог на Фишеровој информацији. Наведени доприноси имају директан утицај на фабрикацију, дизајн и моделовање фотоничних сензора са танким филмовима.

Кандидаткиња је током израде дисертације радила и као део истраживачког тима и самостално и притом достигла висок степен самосталности у научном раду.

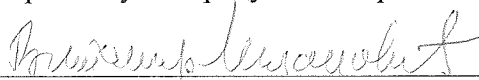
Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика веома актуелна и савремена с аспекта научног и стручног доприноса, верификована објављивањем у више релевантних часописа са SCI листе, и податак да су најважнији резултати добијени самосталним радом, Комисија констатује да је кандидаткиња Невена Раичевић испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Стога, са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља“ кандидаткиње Невене Раичевић прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

25. 03. 2015.

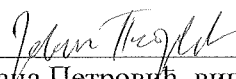
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



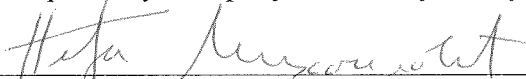
др Јелена Радовановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Витомир Милановић, професор емеритус
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Јована Петровић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке "Винча"



др Пеђа Михаиловић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Александра Малуцков, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке "Винча"