

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Невене Раичевић за израду докторске дисертације.

Одлуком **5056/8/1** бр. од **11.7.2013.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидаткиње Невене Раичевић, дипломираног инжењера електротехнике и рачунарства - мастер, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме дисертације: **„Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља“.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Невена Раичевић је рођена 05.01.1985. године у Београду, где је завршила основну и средњу школу. Уписала је Електротехнички факултет при Београдском Универзитету 2003. године, где је дипломирала 2007. године са просечном оценом 8.29 на Одсеку за Физичку електронику са темом "Унутарзонска резонантна генерација виших хармоника у полупроводничким наноструктурама". Исте године уписала је дипломске академске - мастер студије на модулу Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, које је завршила 2009. године одбраном мастер рада под насловом „Утицај механичког напрезања на спин-орбитну интеракцију у полупроводничким наноструктурама“ са просечном оценом 9.71. Од 15.12.2008. године запослена је у ИНН Винча као истраживач-приправник. Године 2010. унапређена је у звање истраживач сарадник.

1.2 Стечено научноистраживачко искуство

Преглед положених испита

1. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (оцена: 10, ЕПС: 9)
2. Моделовање наноструктура (оцена: 10, ЕПС: 9)
3. Оптичке особине полупроводничких наноструктура (оцена: 10, ЕПС: 9)
4. Нумеричка анализа (оцена: 10, ЕПС: 9)
5. Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници (оцена: 8, ЕПС: 9)

6. Увод у нелинеарну динамику (оцена: 10, ЕПС: 9)
7. Оптиелектронске мерне методе (оцена: 10, ЕПС: 9)
8. Квантна оптика (оцена: 10, ЕПС: 9)
9. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (оцена: 10, ЕПС: 9)
10. Комуникологија (оцена: 10, ЕПС: 6)

Учешће на пројектима

2009-2010

Непосредно пре завршетка дипломских академских - мастер студија Невена Раичевић се запослила у институту Винча где почиње да ради на пројекту Министарства науке *Физика комплексних феномена у плазми, кондензованој материји и нелинеарној оптици*, П 141034, и на билатералном пројекту

Linear and nonlinear wave propagation in waveguide lattices with lattice period smaller than wavelength, German-Serbian Academic Exchange Programme (DAAD), cooperation between Helmut Schmidt Universität, Hamburg, Germany, Technische Universität Clausthal, Germany and Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

Рад на пројекту подразумевао је сарадњу са Универзитетом у Клаусталу у Немачкој где је кандидаткиња провела два месеца учећи нове нумеричке и експерименталне технике везане за оптичке сензоре флуида на бази модова микрорезонатора (whispering gallery modes).

2010-2012

Кандидаткиња је била на професионалном усавршавању у Немачкој где је радила на пројекту:

Evanescent field fiber-optic sensor, DFG project: DE 598/17-1 and KI 482/14-1, Cooperation between Fakultät für Elektrotechnik Experimentalphysik und Materialwissenschaften, Helmut Schmidt Universität (Hamburg) and Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (2009-2012)

У току боравка од 2 године и девет месеци кандидаткиња је савладала следеће експерименталне технике: карактеризацију нано-слојева помоћу призме (одређивање дебљине, индекса преламања и слабљења), полирање фибера и призми, карактеризацију сензора флуида у интегрисаној оптици. Кандидаткиња је савладала и низ нумеричких техника и софтверских пакета за симулацију и анализу експерименталних резултата.

2012-тренутно

По завршетку пројекта кандидаткиња се вратила у институт Винча где је наставила са радом на докторској дисертацији у оквиру пројекта

Фотоника микро и наноструктурних материјала, Министарство просвете, науке и технологије Републике Србије, ИИИИ 45010

Списак радова

Радови објављени у међународним часописима са импакт фактором :

1. A. Woellert, G. Gligoric, M. Skoric, A. Maluckov, N. Raičević, A. Danicic and Lj. Hadzievski, „Modulation Instability of Two-Dimensional Dipolar Bose-Einstein Condensate in a Deep Optical Lattice“, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, No. 4, 519-521 (2009), (M23)

Радови објављени у зборницима међународних конференција

Радови објављени у форми апстраката:

1. N. Raičević, A. Matthias, D. Kip, and J. Deubener, „Evanescent field fiber-optics gas sensor using high index sol-gel nanoporous layer“, *Photonica2011 – III International School and Conference on Photonics*, Book of Abstracts, pp. 135 (2011), (M34)
2. I. Ilić, N. Raičević, „Light scattering by a finite spherical particle“, *Photonica2009– II International School and Conference on Photonics*, Book of Abstracts, pp. 120 (2009) (M34)

Радови објављени у зборницама домаћих конференција

1. M. Mirić, N. Raičević, A. Daničić, „Numerical simulation of the modulation response in semiconductor heterostructure lasers“, *Zbornik radova, 51. konferencija ETRAN*, STU13-MO-1-4, Novi – Igalo, Crna Gora, (2007) (M63)
2. N. Raičević, Milan Tadić, “Uticaj spin-orbitne interakcije na elektronsku strukturu napregnutih poluprovodničkih kvantnih jama orijentacije <110>”, *53. konferencija ETRAN*, Zbornik radova, MO3 nanoETAN 2, 3.5 nagradjen rad, objavljen u Serbian Journal of Electrical Engineering Vol. 6, No. 3, pp. 461, (M63)

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидаткиња поседује одговарајући ниво знања и искуства из области фотонице као и математике и нумеричких метода потребних за реализацију задатака и решавање проблема везаних за израду докторске дисертације. Поред тога, кандидаткиња поседује самосталност у истраживању и брзо и ефикасно усваја нова знања. Приликом учешћа на домаћим и међународним конференцијама кандидаткиња је добијене резултате изложила на високом нивоу. На основу свега изложеног и досадашњих резултата кандидаткиње, наша је процена да је она у стању да успешно реализује и заврши израду докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Оптички сензори део су многобројних система у индустрији, транспорту, телекомуникацијама, медицини и науци. Они се користе за мерење температуре, сила (издужење, притисак, напрезање), индекса преламања околне средине и индиректно концентрације гасова и раствора течности, влажности и другог. Углавном захваљујући нагом развоју телекомуникација, развој оптичких сензора пратио је општи тренд смањивања и интеграције ка малим, робусним и преносивим уређајима. При том су се издвојила два основна типа сензора: у оптичком влакну и интегрисани, који се даље функционализују коришћењем нанотехнологија.

Интегрисани оптички сензори одиграли су посебну улогу у заштити животне средине јер су омогућили ванлабораторијска мерења и битно допринели аутоматизацији лабораторијских мерења. Овом је увелико допринео развој метода за производњу минијатурних сензора и танких филмова који се наносе на површину сензора. Функционализација сензора танким филмовима се показала посебно успешном у развоју уређаја на бази плазмонских резонанци који су комерцијализовани и користе се у лабораторијама широм света. Посебно атрактивну групу сензора чине Брагове решетке, периодичне микроструктуре у материјалу оптичког влакна или интегрисаног таласовода.

Предмет истраживања кандидаткиње Невене Раичевић је налажење новог начина функционализације сензора заснованог на наноструктурирању танких филмова, при чему се под наноструктурама подразумевају структуре различитих степена уређености, од униформног филма, преко решетке до филмова са случајним распоредом градивних честица. Прво ће бити развијен ефективни модел танког филма који одговара танким порозним филмовима који се производе сол-гел техником. Један од најчешће коришћених материјала је титанијум диоксид који има и одличне оптичке особине. Његова порозност и дебљина могу се контролисати излагањем високим температурама, прилагођавањем брзине извлачења супстрата из гела, као и контролом броја нанетих слојева. Параметри овог материјала биће коришћени у симулацијама реалних структура. Затим ће модел бити унапређен узимањем у обзир композиције филма. И ефективни и напреднији модел ће моћи да рачунају сопствене модове структуре и пропагацију светлости кроз њу, те ће се моћи одредити статичке и динамичке особине сензора. Посебно ће бити анализиран сензор са филмом са периодичном структуром (решетком) у ком случају очекујемо резонантно спрезање. Перформансе ових сензора, а пре свих осетљивост, биће упоређени са сензорима на бази филмова са случајним распоредом гранула и филмова са површинском неуређеношћу.

Циљ истраживања кандидаткиње је да проучи утицај неуређености структуре филма на осетљивост сензора и да изведе закључке неопходне за дизајн нових, реално изводљивих, сензора концентрације флуида. Како је ово истраживање оријентисано ка применама, конкретан циљ је да се дизајнирају сензори флуида за примене у заштити животне средине.

Истраживање је, са практичне стране, значајно за унапређење оптичких сензора, искоришћење познатих нанотехнологија за производњу нових сензора и дефинисање праваца развоја нових технологија за производњу танких филмова. Његов допринос фундаменталној науци биће дефинисање нових смерница за примену неуређености система у фотоници.

Релевантни библиографски извори

У истраживању кандидаткиња ће користити релевантне библиографске изворе са резултатима добијеним у анализи особина танких филмова и физици плазмона, као и нумеричке библиографске изворе од којих је неколико најбитнијих излистано у наставку:

1. X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang and H. Ning, "A Survey on Gas Sensing Technology", *Sensors* 12, pp. 9635-9665 (2012)
2. B. D. MacCraith, "Enhanced evanescent wave sensors based on sol-gel-derived porous glass coatings", *Sensors and Actuators B*, 11 pp. 29-34, (1993)
3. A. Bittner, R. Jahn, P. Lobmann, "TiO₂ thin films on soda-lime and borosilicate glass prepared by sol-gel processing: influence of the substrates", *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 58: pp.400–406, (2011)
4. R. Mechiakh, F. Meriche, R. Kremer, R. Bensaha, B. Boudine, A. Boudrioua, "TiO₂ thin films prepared by sol-gel method for waveguiding applications: Correlation between the structural and optical properties", *Optical Materials* 30, pp. 645–651 (2007)
5. *Nature Photonics: Focus Issue – Plasmonics*, Vol. 6. No. 11, pp. 707-794 (2012)
6. A. K. Sharma, R. Jha, and B. D. Gupta, "Fiber-Optic Sensors Based on Surface Plasmon Resonance: A Comprehensive Review", *IEEE SENSORS JOURNAL* 7, No. 8, pp. 1118-1129,(2007)
7. J. M. Pitarke, V. M. Silkin, E.V. Chulkov, and P.M.Echenique, "Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons", *Rep. Prog. Phys.* 70, 1–87(2007)
8. M. L. Nesterov, A. V. Kats and S. K. Turitsyn, "Extremely short-length surface plasmon resonance devices", *Optics Express*, Vol. 16, Issue 25, pp. 20227-20240 (2008)
9. S. Roh, T. Chung and B. Lee, "Overview of the Characteristics of Micro- and Nano-Structured Surface Plasmon Resonance Sensors", *Sensors* No. 11, pp. 1565-1588 (2011)
10. J. Ctyroky, J. Homola, P.V. Lambeck, S. Mussa, H.J.W.M. Hoekstra, R.D. Harris, J.S. Wilkinson, B. Usievich, "Theory and modelling of optical waveguide sensors utilising surface plasmon resonance", *Sensors and Actuators B* 54. 66–73, (1999)
11. H. Ditlbacher, N. Galler, D.M. Koller, A. Hohenau, A. Leitner, F.R. Aussenegg, and J.R.Krenn, "Coupling dielectric waveguide modes to surface plasmon polaritons", *Optics Express*, Vol. 16, Issue 14, pp. 10455-10464 (2008)

12. Kawano and T. Kitoh, "Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrödinger Equation" (John Wiley & Sons, INC., New York, 2001).
13. C. L. Xu and W. P. Huang, "Finite-difference beam propagation method for wave-guide optics", Progress In Electromagnetics Research, PIER 11, 1-49, (1995).
14. Y. Chung and N. Dagli, "An Assessment of Finite Difference Beam Propagation Method", IEEE Journal of Quantum Electronics 26, No. 8, (1990).
15. P. P. Silvester and R. L. Ferrari, "Finite elements for electrical engineers", (Cambridge University Press, 1996).

3. Полазне хипотезе

Интеграција оптичких сензора са оптоелектронским чиповима захтева посебне конфигурације сензора које подржавају интеракцију вођеног светлосног поља са средином и велику осетљивост на малим растојањима. Ово се постиже модовима чије је поље на реповима еванесцентно или посебним резонантним видовима поља, нпр. плазмонама. Дobar пример проблема са смањивањем сензора је сензор који мери губитке у зависности од концентрације околног флуида и чијим дизајном, нпр. увођењем решетке или резонатора, морају да се постигну мерљиви губици на дужинама реда центиметра и мањим.

С обзиром на то да су танки филмови и решетке нано- и микрометарских димензија, развој интегрисаних оптичких сензора уско је повезан са развојем нанотехнологије и обрадом материјала. Могућности примене микро- и наноструктурних материјала се интензивно истражују.

У дисертацији кандидаткиња полази од претпоставке да се структурирањем материјала могу контролисати особине сензора на бази еванесцентног поља. Акценат ће бити стављен на унапређење оптичких сензора са танким филмовима који се користе за детекцију и мерење концентрације флуида. Једна од претпоставки је да се интеракција поља светлости са околним флуидом може појачати коришћењем порозних диелектричних филмова у чије поре могу да уђу молекули флуида. До појачања долази услед тога што велики индекс преламања филма привуче светлост из таласовода, чиме се остварује велико преклапање поља светлости са флуидом који се мери. Друга претпоставка је да се структурирањем танких металних филмова на којима се генеришу плазмони могу контролисати дужине продирања и простирања плазмона и самим тим његова интеракција са околним флуидом. У оквиру овог, претпоставља се да ће ефекти танког филма зависити од степена његове неуређености што ово истраживање приближава низу отворених актуелних проблема који се баве неуређеним системима. Оба правца истраживања воде ка повећању сензитивности и новим начинима за искоришћење технологија израде оптичких сензора.

4. Научне методе истраживања

Физички модели сензора са танким филмом:

- Ефективни модел подразумева да се филм састоји из гранула много већих од величине атома, тако да се могу дефинисати константе материјала, и истовремено много мањих од таласне дужине, тако да се филм може сматрати униформним. Индекс преламања се рачуна усредњавањем индекса гранула и шупљина (које могу да буду испуњене флуидом) по запремини.
- За моделовање уређеног филма користиће се метода спрезања модова која периодичност филма третира као пертурбацију његовог индекса преламања. Применом математичког формализма теорије пертурбација на Максвелове једначине изводи се услов слагања фаза и једначине простирања модова кроз структуру.

Нумеричко решавање једначина биће урађено:

- методом коначних елемената коришћењем софтверског пакета COMSOL
- методом коначних разлика помоћу сопственог програма написаном у MATLAB-у

Експериментално испитивање могућности сензора кандидат је извео на Универзитету Хелмут-Шмит у сарадњи са Универзитетом Клаусталу. Урађени су следећи експерименти:

- наношење танких филмова од титанијум диоксида сол-гел техником
- карактеризација танких филмова *atomic force* микроскопом
- карактеризација танких филмова помоћу елипсометрије
- побуђивање плазмона методом спрезања помоћу призме и мерење њихових спектра

5. Очекивани научни доприноси

У оквиру ове дисертације очекују се следећи резултати:

- Развој оригиналних поступака за симулацију интегрисаних оптичких сензора концентрације флуида на бази еванесцентног поља
- Конструисање ефективног физичко-математичког и нумеричког модела порозног танког филма и његове интеракције са флуидом
- Комплетан динамички опис електромагнетног поља светлости и њене интеракције са флуидом у околини сензора, као и са флуидом који продире у порозни филм
- Анализа рада сензора концентрације флуида на бази порозних диелектричних и металних филмова.

- Оцена перформанси сензора са танким филмовима који се могу реализовати постојећим технологијама и предлог нових структура
- Разумевање утицаја неуређености структуре филма на рад сензора

Ови резултати могли би да нађу следеће примене:

- Као полазна тачка за дизајн нових сензора на бази наноструктурираних танких филмова.
- У дизајну сензора осетљивијих у односу на постојеће, а који се могу фабриковати постојећим технологијама.
- У дизајну интегрисаног сензора концентрације угљен-диоксида.

6. План истраживања и структура рада

Истраживање ће се одвијати у неколико фаза. Почетна фаза ће се састојати у прегледу постојећих сензора на бази еванесцентног поља, прегледу технологија за производњу танких филмова и њихових ограничења, и испитивању погодних геометрија сензора са диелектричним и металним филмовима помоћу симулација у COMSOL-у. Биће генерисан сопствени нумерички код за прорачун и оптимизацију особина најперспективнијих сензора и простирања светлости кроз њих. Следећа фаза ће бити заснована на нумеричкој оптимизацији наноструктуре диелектричног филма за примене сензора у мерењима концентрације флуида. При том ће се испитивати ефекти порозности, хрпавости металног филма и уређене структуре као што је решетка, у циљу проналажења оптималне структуре филма. У завршној фази биће дизајниран интегрисани сензор за мерење концентрације угљен диоксида.

Дисертација ће имати следећу структуру:

У уводу ће бити дат преглед постојећих сензора на бази еванесцентног поља и танких филмова, као и технологије њихове фабрикације. Затим ће бити објашњени коришћени експериментални и нумерички методи. Резултати ће бити представљени као две међусобно повезане целине. Први део биће посвећен експерименталним резултатима из којих су добијени параметри употребљени у симулацијама. Други део биће посвећен представљању резултата нумеричких симулација и анализи нових сензора на бази еванесцентног поља. Централни део рада бавиће се особинама и оптимизацијом сензора са филмовима различитог степена неуређености. Биће дата анализа њихове осетљивости на угљен диоксид и биће предложен дизајн новог сензора чија наноструктура оптимизује интеракцију поља светлости са околним флуидом. У закључку ће особине ових сензора бити упоређене са постојећим и продискутоваће се правци развоја нових сензора који се могу функционализовати применом нанотехнологије.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидаткиње Невене Раичевић, дипломираног инжењера електротехнике и рачунарства - мастер, Комисија је закључила:

1. Кандидаткиња испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације;

2. Предложена тема **“Оптички сензори концентрације флуида на бази еванесцентног поља”** је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи изградом ове дисертације биће значајан и оригиналан допринос овој области. Због тога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидаткињи Невени Раичевић одобри израду докторске дисертације под наведеним називом, а под менторством др Јелене Радовановић, ванредног професора Електротехничког факултета у Београду.

У Београду, 15. 08. 2013.

Чланови Комисије

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

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

Др Витомир Милановић, професор емеритус
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

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