

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **Марка Обрадова**, дипломираног инжењера – мастера електротехнике и рачунарства, истраживача сарадника Центра за микроелектронске технологије Института за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду, студента докторских студија на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет, у даљем тексту „кандидат”, за израду докторске дисертације.

Одлуком бр. 5022/10-1 од 2. 10. 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Марка Обрадова за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Марко Обрадов, дипломирани инжењер – мастер електротехнике и рачунарства рођен је 22.10.1984. године у Ужицу, где је завршио основну школу и гимназију. Електротехнички факултет, Универзитета у Београду, уписао је 2003. године и дипломирао 2008. године на Одсеку за Физичку електронику, са темом „Електронска структура латерално спрегнутих квантних тачака” и просечном оценом 8,02. Школске 2008/2009 године уписао је дипломске академске - мастер студије на Одсеку за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет. Мастер тезу „Вишезонски модел електронске структуре и оптичких особина сферних полупроводничких нанокристала” одбранио је 2010. године завршивши тиме дипломске академске – мастер студије са просечном оценом 10,00. Докторске студије на Одсеку за наноелектронику и фотонику, на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет уписао је 2010. године. Положио је све испите на докторским студијама са просечном оценом 10.

Од 2010. године је запослен у Институту за хемију, технологију и металургију, Центар за микроелектронске технологије, тренутно у звању истраживач сарадник. У центру се бави истраживањима везаним за области фотоники, плазмоники и НЕМС сензора, као и истраживањем и развојем нових сензорских структура и фотодетектора, мерењима и карактеризацијом.

У току 2011. био је на двомесечној специјализацији у Delft Institute of Microsystems and NanoElectronics (DIMES), Delft, Холандија. Говори енглески језик и користи се руским.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је до сада положио све предвиђене испите планом студија Модула за наноелектронику и фотонику, Електротехничког факултета.

Преглед положених испита

Назив предмета	Оцена	ЕСПБ	Предметни наставник
Фуријеова оптика	(десет) 10	9	Јован Елазар
Квантна оптика	(десет) 10	9	Милан Тадић
Руски језик	(десет) 10	6	Милена Славић
Оптичке особине полупроводничких хетероструктура	(десет) 10	9	Витомир Милановић
Електричне и оптичке карактеристике материјала у наноелектроници и фотоници	(десет) 10	9	Небојша Ромчевић
Скенирајућа микроскопија у нанонауци и нанотехнологији	(десет) 10	9	Радослав Гајић
Фотонски кристали и оптички метаматеријали	(десет) 10	9	Зоран Јакшић
Спектроскопија чврстих материјала	(десет) 10	9	Зоран Поповић
Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара	(десет) 10	9	Јелена Радовановић
Моделовање наноструктура	(десет) 10	9	Милан Тадић

Додатне обавезе:

Назив обавезе	ЕСПБ
Научно стручни рад	3
Студијски истраживачки рад I	15
Студијски истраживачки рад II	15

Кандидат је дана 27. октобра 2014. полагао докторски испит на Електротехничком факултету у Београду, при чему је комисија у саставу проф. др Милан Тадић, ЕТФ (председник), др Катарина Радуловић, научни саветник ИХТМ и проф. Милан Прокин, ЕТФ једногласно закључила да су кандидат и тема подобни за израду докторске дисертације на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет.

Учесће на пројектима

- Међународни пројекат FP7 Европске Уније, 2008.-2012. „Reinforcement of Regional Microsystems and Nanosystems Center – REGMINA”, FP7 REGPOT EU 205533
- Пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије TR32008 "Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине".
- Пројекат Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије "Микросистемске, наносистемске технологије и компоненте", 11027

- Пројекат Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије "Интелигентни индустријски трансмитери на бази сопствених ИХТМ сензора", 11025.

Истраживачко искуство

Кандидат од 2010. године и добијања степена дипломираног инжењера без прекида ради на научно-истраживачким задацима у Центру за микроелектронске технологије Института за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду, најпре као истраживач приправник, а после добијања степена мастера и избора у звање у 2012. као истраживач сарадник.

Кандидат се од запослења бави тематиком МЕМС и НЕМС сензора и детектора, а главне теме његових истраживања су плазмонске методе за побољшање инфрацрвених детектора, хемијски сензори засновани на истим методама, као и методе карактеризације микросистемских и наносистемских (МЕМС и НЕМС) детектора.

Од 2010. године публиковао је као коаутор или основни аутор преко 20 референци са М фактором, укључујући два рада класе М20, 11 радова класе М33, 7 радова класе М63, као и два техничка решења. Структура радова показује да се бавио како теоријским, тако и експерименталним аспектима наведених тематика, као и нумеричком симулацијом и моделовањем. На неколико публикација је први аутор, што показује научну зрелост и иницијативу.

Тематика већине радова кандидата, укључујући све радове класе М20 и 10 радова класе М33 од укупно 11, непосредно је везана са тематиком предложене дисертације (плазмоника као начин побољшања МЕМС и НЕМС сензора и детектора, односно коришћење наноплазмонских структура за побољшање перформанси инфрацрвених детектора).

Списак научноистраживачких референци кандидата.

М22 Рад у истакнутом међународном часопису (Првих 50% часописа ISI листе)

1. D. Tanasković, **M. Obradov**, O. Jakšić, Z. Jakšić, "A low-loss double fishnet metamaterial based on transparent conductive oxide", *Phys. Scr.* vol. T162, art. 014048 pp. 1-4, Sep 2014, doi:10.1088/0031-8949/2014/T162/014047 (IF=1.296, 39/77 in Physics, Multidisciplinary), ISSN 0031-8949.

М24 Рад у часопису међународног значаја верификованом посебном одлуком

1. Z. Jakšić, **M. Obradov**, S. Vuković, M. Belić, "Plasmonic enhancement of light trapping in photodetectors", *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics*, Vol. 27, No 2, pp. 183-203, doi: 10.2298/FUEE1402183J, June 2014, ISSN 0353-3670.

М33 Саопштење са међународног скупа штампано у целини

1. Z. Jakšić, M. Sarajlić, K. Radulović, **M. Obradov**, D. Tanasković, S. Vuković, "Photon management in semiconductor infrared photodetectors: Diffractive and plasmonic antireflective structures", *Proc. 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012*, Belgrade, pp. 673-678, Sep. 18-19, 2012, isbn 978-86-81123-85-4.
2. Z. Jakšić, D. Randjelović, **M. Obradov**, K. Radulović, "Redshifting Approach for Nanoplasmonic Enhancement of Semiconductor Infrared Detectors", *Proc. 28th*

- International Conference on Microelectronics MIEL 2012*, Niš, Serbia, May 13-16, pp. 207-210, 2012, ISBN 978-1-4673-0235-7 (Best Oral Paper Award)
3. **M. Obradov**, Z. Jakšić, M. Sarajlić, D. Randjelović, "Redshift by Design for Plasmonic Enhancement of Ultrathin Infrared Detectors", *Proc. 34th PIERS*, Stockholm, Sweden, 12-15 August, pp. 1712-1716, 2013, ISBN 978-1-934142-26-4, 2013
 4. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Tanasković, "Plasmonic Metamaterial with Fishnet Superlattice for Enhanced Chemical Sensing", *Proc. 29th International Conference on Microelectronics MIEL 2014*, Niš, Serbia, May 12-15, pp. 137-140, ISBN 978-1-4799-5295-3
 5. M. Frantlović, I. Jokić, Ž. Lazić, B. Vukelić, **M. Obradov**, D. Vasiljević-Radović, "Temperature Measurement Using Silicon Piezoresistive MEMS Pressure Sensors", *Proc. 29th International Conference on Microelectronics MIEL 2014*, Niš, Serbia, May 12-15, pp. 159-161, ISBN 978-1-4799-5295-3
 6. **D. Tanasković**, O. Jakšić, M. Obradov, Z. Jakšić, "Investigation of possible superstructures for nanoaperture array-based plasmonic sensors for simultaneous detection of multiple dangerous substances", *Proc. 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2014*, Belgrade, pp. 802-806, Oct. 9-10, 2014, isbn 978-86-81123-71-3
 7. K. Radulović, Z. Jakšić, **M. Obradov**, D. Vasiljević Radović, "Analysis of acoustic cloaks for anti-sonar camouflage based on local resonance in acoustic metamaterials", *Proc. 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2014*, Belgrade, pp. 743-748, Oct. 9-10, 2014, isbn 978-86-81123-71-3
 8. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Vasiljević Radović, "Light concentration in semiconductor infrared Detectors for night vision by graded antireflection Layer incorporating plasmonic particles", *Proc. 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2014*, Belgrade, pp. 507-512, Oct. 9-10, 2014, isbn 978-86-81123-71-3
 9. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Vasiljević-Radović, "Infrared Photodetector Enhancement Utilizing Transparent Conductive Oxide Submicrometer Particles Embedded in Gradient Index Antireflection Layer", *Proc. 1st Internat. Conf. IcETRAN*, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.4.1-6, ISBN 978-86-80509-70-9
 10. D. Tanasković, Z. Jakšić, **M. Obradov**, O. Jakšić, I. Mladenović, "Unit-cell level superstructures for the extension of spectral range of double fishnet metamaterial parameters and tuning of their effective optical properties", *Proc. 1st Internat. Conf. IcETRAN*, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.6.1-5, ISBN 978-86-80509-70-9
 11. Z. Jakšić, J. Matović, A. Lugstein, **M. Obradov**, "Tailorable plasmonic response of freestanding metal-composite nanomembranes with 2D arrays of subwavelength circular apertures", *Proc. 1st Internat. Conf. IcETRAN*, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.3.1-5, ISBN 978-86-80509-70-9

M63 Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини

1. **M. Obradov**, M. Tadić, "Višezonski model šupljinskih stanja u nanokristalnim kvantnim tačkama", *Proc. 55th Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Banja Vrućica, June 6-9, 2011, pp. MO2.8.1-4, ISBN 978-86-80509-66-2
2. B. Vukelić, **M. Obradov**, B. Rosandić, S. Milosavljević, J. Lamovec, "Wet etch rates and selectivity in DIMES CR100 etching line", *Proc. 55th Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Banja Vrućica, June 6-9, 2011, pp. MO3.4.1-4, ISBN 978-86-80509-66-2
3. **M. Obradov**, B. Vukelić, M. Tadić, "Šupljinska stanja u poluprovodničkim nanokristalima: poređenje Latindžer-Konovog i Bart-Foremanovog modela", *Proc. 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, June 11-14, 2012, MO2.5-1-4, ISBN 978-86-80509-67-9

4. B. Vukelić, M. Frantlović, **M. Obradov**, "Razvoj prototipa inteligentnog merača pritiska sa Ethernet komunikacijom", *Proc. 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, June 11-14, 2012, MO3.7-1-4, ISBN 978-86-80509-67-9
5. I. Jokić, K. Radulović, M. Frantlović, **M. Obradov**, "Kompetitivna reverzibilna adsorpcija spregnuta sa prenosom mase kod mikro/nanobiosenzora sa protočnom reakcionom komorom", *Proc. 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, June 3-6, 2013, MO2.8-1-5, ISBN 978-86-80509-68-6
6. **M. Obradov**, Z. Jakšić, M. Sarajlić, D. Randelović, "Transparent conductive oxide nanoparticles for enhancement of ultrathin photodetectors", *Proc. 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, June 3-6, 2013, MO2.4-1-5, ISBN 978-86-80509-68-6
7. F. Radovanović, T. Tomković, A. Nastasović, **M. Obradov**, Z. Jakšić, "Nanoplasmonic Multifunctionalization of Glycidyl Methacrylate Hydrogel Membranes for Adsorption-based Chemical Sensors with Enhanced Selectivity", *Proc. 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, June 3-6, 2013, MO2.5-1-5, ISBN 978-86-80509-68-6

M83 Ново лабораторijsko постројење, ново експериментално постројење, нови технолошки поступак

1. J. Lamovec, V. Jović, I. Mladenović, B. Popović, M. Vorkapić, **M. Obradov**, "Poboljšana mehanička svojstva tankih laminatnih kompozitnih filmova Ni/Cu za primenu u mikroelektromehaničkim sistemima (MEMS)", TR-32008 MPN Beograd, korisnik IHTM, rukovodilac J. Lamovec, 2012

M85 Техничка решења: Прототип; нова метода; софтвер, инструмент

1. D. Randjelović, M. Frantlović, B. Rosandić, B. Miljković, B. Popović, **M. Obradov**, M. Vorkapić, "Transmitter vakuum na bazi sopstvenog MEMS senzora sa termoparovima", Laboratorijski prototip, TR-32008 MPN Beograd, korisnik IHTM, rukovodilac D. Randjelović, 2011

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

- Кандидат Марко Обрадов је од 2010. године у оквиру Центра за микроелектронске технологије ИХТМ Универзитета у Београду непосредно укључен у научно-истраживачки рад из области плазмонице и фотодетектора, што су области директно повезане са тематиком предложене докторске дисертације.
- Он поседује одговарајуће знање и искуство како из теоријских области, тако и из нумеричких метода потребних за решавање проблема из области предложене теме докторске дисертације (метода коначних елемената и моделовање електромагнетских процеса у наносистемским и наноелектронским направама).
- Из области којом се бави докторска дисертација кандидат је до сада публиковао 2 рада у часописима класе M20, као и 11 радова на међународним конференцијама. Поред радова наведених на листи има и првопотписани рад M21 прихваћен за публикацију (већ прошао стадијум page proof-a, али није наведен на листи због за сада непотпуних библиографских података).
- Кандидат показује изузетну самосталност и иницијативу у научни-истраживачким задацима и изузетно брзо овладава новим тематикама.
- Кандидат је положио све испите на докторским студијама Електротехничког факултета са просечном оценом 10. Поред тога, кандидат је пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета, на јавној усменој одбрани, успешно положио докторски испит, одржан 06.6.2014.

- На основу наведених резултата, наша је процена да је кандидат Марко Обрадов у стању да успешно реализује и заврши израду докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Једна од релативно недавно уведених парадигми које су оставиле и настављају да праве велики траг у електромагнетици, науци о материјалима и нанонаукама је плазмоника, део електромагнетске оптике који се бави простирањем површинских плазмона поларитона (Surface Plasmons Polaritons, SPP). SPP су поларизовани електромагнетни таласи (поларитони) који се простиру на раздвојној површини проводник-диелектрик спрегнути са резонантним осцилацијама слободних електрона у проводном делу. Интензитет ових електромагнетних таласа експоненцијално опада са удаљавањем од међуповршине проводник-диелектрик, а међу њихове најважније особине спадају појава да задржавају учесталост али поседују значајно краћу таласну дужину у односу на електромагнетни талас који их је ексцитовао (скраћење таласне дужине је и до неколико редова величине у поређењу са конвенционалним простопериодичним простирућим таласима), ово за последицу има појаву јаких локализација праћених огромним интензитетом електромагнетног поља на подталасном нивоу као и могућност готово потпуне контроле над њиховом фреквентном и просторном дисперзијом. Ово нарочито долази до изражаја на наноконструкцијама полупроводник-диелектрик, код којих су добијене структуре са негативним групним брзинама („леворука” светлост), врло ниским („спора” светлост) и врло високим („суперлуминална” или „брза” светлост). Развој плазмонице био је један од фактора који су довели до увођења концепта тзв. трансформационе оптике, где се врши конформно пресликавање оптичког простора између две произвољне геометрије, а резултат су између осталог били суперконцентратори оптичког поља, суперапсорбери, структуре за електромагнетну камуфлажу („cloaking device”) итд.

Међу областима у којима плазмоника налази све већу практичну примену су сензорица (израда ултрасетљивих сензора хемијских и биолошких агенаса) и побољшање карактеристика фотодетектора. Нарочито је значајна примена плазмонице за побољшање карактеристика соларних ћелија.

Концепт плазмонских структура за побољшање фотодетектора у основи је једноставан. Пошто плазмонске честице или структуре (нпр. метали као злато, сребро) могу направити локализације оптичког поља на простору мањем од таласне дужине, онда се овакве структуре могу као концентратори интегрисати са фотодетектором. Захваљујући томе запремина детектора може бити много мања од коришћене у конвенционалним направама, а да при том еквивалентна густина енергије и осетљивост детектора буду идентичне или чак боље код направа са плазмонским побољшањем. Приликом примене за фотонапонске соларне ћелије ово значи огромне уштеде у скупом материјалу, јер фотодиоде могу бити знатно тање него класичне. На ову тему публикован је велики број радова у еминентним научним часописима као што су *Nature* и *Science*.

Друга група фотодетектора од интереса су направе за инфрацрвену детекцију, које се користе у различитим областима као што су термовизија, ноћно навођење, праћење топлотног записа и слично. Међу областима примене су даљинско мерење температуре, од интереса нпр. у погонима електропривреде, трафоима, генераторима итд.

Циљ предложених истраживања је разматрање могућности коришћења концепата плазмонице за побољшање карактеристика инфрацрвених детектора. Основни проблем приликом примене плазмонице на инфрацрвене сензоре јесте у томе што су резонантне фреквенције (плазма фреквенције) уобичајених материјала као што су добри метали у ултраљубичастом или видљивом делу спектра. Због тога је неопходно извршити померај спектралне карактеристике према црвеном. Циљ дисертације је да утврди колики померај је реално остварљив и којим методама, као и колики је очекивани ниво побољшања параметара

фотодетектора у односу на конвенционалне, пре свега њихове осетљивости и специфичне детективности.

Поред очекиваних резултата у области самих инфрацрвених детектора, очекује се да један део добијених резултата буде применљив на друге типове фотодетектора, пре свега на соларне ћелије. Такође се очекује применљивост у структурама трансформационе оптике, нарочито у суперконцентраторима и суперапсорберима.

Релевантни библиографски подаци

Кандидат ће у раду на дисертацији користити библиографске изворе који се баве: (1) наноплазмоником, (2) метаматеријалима и (3) побољшањем фотодетектора коришћењем плазмонице. Најважније референце које ће бити коришћене су:

1. E. Ozbay, "Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions," Science, vol. 311, no. 5758, pp. 189-193, 2006.
2. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," Nature, vol. 424, no. 6950, pp. 824-830, 2003.
3. H. A. Atwater, and A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," Nature Materials, vol. 9, no. 3, pp. 205-213, 2010.
4. A. Boltasseva, and H. A. Atwater, "Low-Loss Plasmonic Metamaterials," Science, vol. 331, no. 6015, pp. 290-291, 2011.
5. R. A. Pala, J. S. Liu, E. S. Barnard, D. Askarov, E. C. Garnett, S. Fan, and M. L. Brongersma, "Optimization of non-periodic plasmonic light-trapping layers for thin-film solar cells," Nature Communications, vol. 4, 2013.
6. Z. Jakšić, "Micro and Nanophotonics for Semiconductor Infrared Detectors: Towards an Ultimate Uncooled Device", Springer International Publishing, Cham, Switzerland, ISBN 978-3-319-09673-5, DOI10.1007/978-3-319-09674-2, 2014.
7. J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields," Science, vol. 312, no. 5781, pp. 1780-1782, 2006.
8. J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, "Mimicking surface plasmons with structured surfaces," Science, vol. 305, no. 5685, pp. 847-848, 2004.
9. S. V. Boriskina, H. Ghasemi, and G. Chen, "Plasmonic materials for energy: From physics to applications," Materials Today, vol. 16, no. 10, pp. 375-386, 2013.
10. A. Polman, and H. A. Atwater, "Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics," Nature Mater., vol. 11, no. 3, pp. 174-177, 2012.
11. Z. Yu, G. Veronis, S. Fan, and M. L. Brongersma, "Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures," Appl. Phys. Lett., vol. 89, no. 15, pp. 151116.1-3, 2006.
12. S. A. Maier, Plasmonics: Fundamentals and Applications, Springer Science+Business Media, New York, NY, 2007.

3. Полазне хипотезе

Основна хипотеза је да се конфинирањем оптичког поља на субмикрометарске и нанометарске димензије може омогућити већи број међузонских прелаза између проводне и валентне зоне у ускозоналним полупроводницима без уласка у засићење или нежељених ефеката који би значајније ограничили достижене перформансе у смислу осетљивости и квантне ефикасности. Следећа хипотеза јесте да се комбинацијом више метода за црвени помак спектралног одзива плазмонских структура може постићи збирни ефекат довољно велики да обезбеди квалитетно функционисање фотодетектора у средњеталасном и дуготаласном инфрацрвеном опсегу. Претпоставка је да се у ту сврху могу користити

алтернативни плазмонски материјали као што су транспарентни проводни оксиди (Transparent Conductive Oxides, TCO), будући да се њихове плазма фреквенције налазе у блиској инфрацрвеној области тј. њихова спектрална карактеристика је значајно померена у црвено у односу на уобичајене плазмонске материјале. Други ефекат чије је дејство црвеног помераја кумулативно са црвеним померајем својственим материјалу јесте имерзија проводних делова плазмонске структуре у диелектрик са високим индексом преламања. Прелиминарни прорачуни показују да су добијени помераји заиста такви да обезбеђују значајно повећање осетљивости у инфрацрвеном таласном опсегу. Очекује се да ће нови степен слободе у пројектовању фотодетектора бити омогућен коришћењем комплекснијих наноплазмонских структура. Такође се очекују решења за плазмонско побољшање фотодетектора применом *top-down* приступа (уређени дводимензионални низови апертура у плазмонском материјалу) као и *bottom-up* приступа (плазмонске наночестице и субмикрометарске честице).

Значајна претпоставка која би могла омогућити нови ниво квалитета рада фотодетектора јесте да ће ефективно смањење запремине детектора за последицу имати смањење нивоа термалног шума, што би резултовало у побољшању њихове специфичне детективности као најбитнијег параметра квалитета детектора. Познато је да је број аката генерације-рекомбинације сразмеран концентрацији носилаца и запремини активне области фотодетектора. Док ће конфинирање поља свакако повећати ниво оптичке генерације, познато је да је главни механизам шума у инфрацрвеним фотодетекторима базираним на ускозоналним полупроводницима Ожеов (Auger), а овај механизам је нерадијативан, тако да би побољшање карактеристика детектора захваљујући плазмонској локализацији поља морало бити значајно.

4. Научне методе истраживања

- За нумеричку симулацију карактеристика и перформанси плазмонских структура за побољшање фотодетектора планира се примена методе коначних елемената (Finite Element Method, FEM). У ту сврху користиће се софтверски пакет "COMSOL Multiphysics". Планира се моделовање на нивоу интегрисане компоненте, дакле спрегнути прорачуни плазмонске структуре, саме активне области фотодетектора, али и антирефлексних слојева базираних на материјалима са градијентним индексом преламања као интегралних делова детектора.
- Све симулације радиће се без увођења апроксимација, *ab initio* методом моделовања електромагнетних особина система тј. оптичких односно плазмонских карактеристика сензора почев од Максвелових једначина односно Хелмхолцове једначине, уз дефинисање одговарајућих скупова граничних услова.
- Планира се разматрање реалних структура фотодетектора израђених танкослојним методама. У ту сврху користиће се параметри инфрацрвених фотодетектора базираних на жива кадмијум телуриду произведених у Центру за микроелектронске технологије ИХТМ. Ови детектори имају микрометарски слој активног материјала на дебљој подлози од кадмијум телурида, тако да је њихова геометрија готово идеална за предложену методу побољшања. Њихови експериментално одређени параметри биће коришћени као улаз за симулације.
- Разматраће се различити принципи побољшања осетљивости фотодетектора применом плазмонице, што укључује коришћење плазмонских наночестица и субмикрометарских честица, али и периодичних нанокомпозита проводник-диелектрик. Такође ће се разматрати параметри различитих плазмонских материјала са циљем оптимизације црвеног помака.

5. Очекивани научни доприноси

Већина очекиваних научних резултата предложене дисертације треба да буде нова на светском нивоу. Међу њих спадају:

- Увид у физику и електромагнетику плазмонског побољшања полупроводничких инфрацрвених детектора.
- Предлог нових геометрија за побољшање и оптимизацију црвеног помака у фотодетекторима са циљем повећања осетљивости и специфичне детективности.
- Предлог нове методе потискивања нивоа генерационо-рекомбинационог шума у полупроводничким инфрацрвеним детекторима, пре свега Ожеовог механизма, са циљем подизања радне температуре детектора и приближавања функцији на собној температури.
- Нова систематизација плазмонских метода побољшања перформанси фотодетектора.
- Заокружени модел инфрацрвеног фотодетектора са могућношћу оптимизације карактеристика за разне оперативне опсеге, моларне уделе кадмијума у детекторском материјалу и радне температуре.
- Очекује се да истраживања урађена у оквиру дисертације послуже као основа за каснија истраживања која треба на крају да доведу до израде функционалних модела и прототипова жива кадмијум телуридних инфрацрвених детектора побољшаних плазмонским структурама, који би били у потпуности израђивани у Центру за микроелектронске технологије ИХТМ.

6. План истраживања и структура рада

Истраживања ће бити обављана у неколико корака:

1. Разматрање физике плазмонских структура, што укључује: а) плазмонске наночестице и субмикрометарске честице и б) уређене низове подталасних апертура у плазмонском материјалу.
2. Разматрање алтернативних плазмонских материјала погодних за померање карактеристике према црвеном делу спектра.
3. Анализирање могућих геометрија и параметара структура за побољшање осетљивости и детективности фотодетектора.
4. Израда детаљних модела, примена симулације коначним елементима и анализа добијених резултата.
5. Анализа сузбијања Ожеових и других генерационо-рекомбинационих процеса у детекторима применом плазмонских метода.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Марка Обрадова, дипломираног инжењера-мастера електротехнике и рачунарства, Комисија је закључила да:

1. Кандидат 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 дисертације **"Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора"** је у тренду са глобалним научним кретањима из области плазмоники чији се резултати тренутно објављују у најцитиранијим међународним часописима. Поред великог теоријског интереса, тематика је подједнако занимљива са практичне тачке гледишта јер се побољшани детектори са повишеном радном температуром користе у разноврсним областима као

што су даљинска мерења, термовизија, испитивање материјала, контрола електроенергетских постројења, али и наменске примене у антитерористичким дејствима и генерално одбрани. Предложене детекторске компоненте спадају међу онакве какве су већ произвођене у матичној научноистраживачкој организацији кандидата. Предложена истраживања у оквиру дисертације имају велики потенцијал да доведу до нових резултата, научно су добро заснована и представљају новину на светском нивоу.

3. Кандидат Марко Обрадов се од почетка својег бављења научним истраживањима од 2010. године бави научним истраживањима из области микросистемских и наносистемских сензора, дакле тематике коју покрива предложена дисертација. Увид у публикације кандидата показује да су његови радови у међународним часописима класе M22 и M24 директно везани за предложену тематику дисертације. Исто важи и за радове на међународним конференцијама публиковане у целости, где 10 радова од 11 спада у најужу област дисертације. Комисија сматра да тематика и континуитет досадашњег научноистраживачког рада несумњиво показују да је кандидат подобан за реализацију предвиђених циљева истраживања.

Ужа научна област дисертације је **микроелектроника**, за коју је Универзитет у Београду – Електротехнички факултет матичан. Због тога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Марку Обрадову одобри израду докторске дисертације под горе наведеним називом. За ментора дисертације предлаже се др **Зоран Јакшић**, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију. Уз овај извештај прилаже се списак радова ментора на одговарајућем формулару Универзитета.

Београд, 10.11.2014.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Зоран Јакшић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за хемију,
технологију и металургију

др Милан Тадић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Катарина Радуловић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за хемију,
технологију и металургију

др Милан Прокин, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет