

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Марка Обрадова, мастер инжењера електротехнике и рачунарства**

Одлуком Наставно-научног већа бр. 5022/10-3 од 24. 05. 2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Обрадова, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом

Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Марко Обрадов је уписао докторске студије у пролећном семестру школске 2010/11 године. Тему докторске дисертације „Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора” Марко Обрадов пријавио је 11. 09. 2014. године на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет. 17. 09. 2014. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5022/10-1 од 2.10.2014.). 18. 11. 2014. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5022/10-2). Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке 61206-5766/2-14 од 22. 12. 2014. године).

Кандидат Марко Обрадов, мастер инжењер електротехнике и рачунарства предао је 05. 05. 2016. године докторску дисертацију на преглед и оцену. 10. 05. 2016. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 5022/10-3 од 1. 6. 2016. године). у следећем саставу: др Зоран Јакшић, научни саветник, Институт за хемију, технологију и металургију; др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду; др Јелена Радовановић, редовни професор, Електротехнички факултет

Универзитета у Београду; др Катарина Радуловић, научни саветник, Институт за хемију, технологију и металургију; др Владимир Арсоки, доцент, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Ова дисертација припада научној области техничких наука – електротехника и рачунарство (оптоелектроника, нанотехнологије, нанофотоника и нанооптика, електромагнетска оптика, плазмоника и метаматеријали) за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Именован је ментор, др Зоран Јакшић, научни саветник Института за хемију, технологију и металургију.

Др Зоран Јакшић, научни саветник Института за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду, остварио је бројне теоријске и практичне доприносе из области електротехнике, укључујући формирање истраживачке групе и лабораторије за плазмонику и хемијске сензоре, вођење националних и међународних научних пројеката и отварање неколико нових научних области. Објавио је преко три стотине рецензираних научних публикација, укључујући 71 рад у међународним часописима, две међународне монографије и неколико поглавља у међународним монографијама. У последњих пет година објавио је монографију класе М11 за издавача Springer Verlag на којој је једини аутор, 7 радова М21, 13 радова М22 и 3 рада М23, као и 5 радова по позиву на међународним конференцијама. Сви радови из последњих 5 година без изузетка спадају у најужу област дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Обрадов је рођен 22. 10. 1984. год. у Ужицу, где је завршио основну школу и математички смер у Ужичкој гимназији. Студије на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет, одсек за Физичку електронику, започео је школске 2003/04. Дипломирао је на поменутом одсеку у септембру 2008. са дипломским радом „Електронска структура латерално спрегнутих квантних тачака”, код проф. др Милана Тадића.

Мастер тезу одбранио је 2010. године на Електротехничком факултету, одсек за физичку електронику, са темом „Вишезонски модел електронске структуре и оптичких особина сферних полупроводничких нанокристала”, код проф. др Милана Тадића.

Од 2010. је запослен у Центру за микроелектронске технологије Института за хемију, технологију и металургију (ИХТМ-ЦМТ) Универзитета у Београду, где тренутно има звање истраживач сарадник. Као аутор или коаутор објавио је 8 радова у међународним часописима, 18 у зборницима са међународних конференција и 8 на националним симпозијумима.

Његова научна интересовања укључују микроелектронику, оптоелектронику, нанофотонику, наноплазмонику, плазмонске метаматеријале, полупроводничке фотодетекторе и моделовање у електромагнетици.

Учествовао је на неколико научноистраживачких пројеката ресорног министарства: 2008 – 2011. „Микросистемске, наносистемске технологије и компоненте” ТР-11027; 2011 – данас „Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине – МиНаСиС”, ТР-32008. Такође је учествовао на једном међународном пројекту, ФП7 Европске Уније, 2008 – 2012. „Reinforcement of Regional Microsystems and Nanosystems Center – REGMINA”, FP7 REGPOT EU 205533.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација има укупно 135 страна и садржи 63 слике, 131 једначину, 1 табелу и 94 библиографске референце. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. 12. 2011. године. Састоји се од насловне стране, кратког резимеа на српском и енглеском језику, садржаја и текста дисертације подељеног на 8 целина:

1. Увод,
2. Основе плазмонице,
3. Инфрацрвени детектори,
4. Принципи побољшања ИЦ фотодетектора,
5. Нумеричке методе,
6. Резултати и дискусија,
7. Закључак,
8. Референце.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводу је дато образложење важности тематике и циљева саме дисертације. Дат је преглед неких најосновнијих карактеристика плазмонских ексцитација као и читав дијапазон савремених примена плазмонице у бројним областима као што су интегрисана оптичка кола, сензори, оптички концентратори итд. Такође је дат кратак преглед значаја фотодетекције уопште са посебним освртом на детекцију инфрацрвеног зрачења и индустријске и безбедносне примене ИЦ детектора. Додатно је дат кратак преглед основних проблема асоцираних са довођењем плазмонске локализације у средњеталасни и дуготаласни део ИЦ спектра. Увод такође садржи кратак опис појединих поглавља дисертације.

У другој глави су приказане особине фундаменталних плазмонских ексцитација: површинских плазмона поларитона (*Surface Plasmon Polariton - SPP*) и локализованих површинских плазмона (*Localized Surface Plasmon - LSP*). Укратко је представљен Друдеов модел дисперзије електричне пермитивности материјала који садрже слободне носиоце - племенити метали и електропроводни провидни оксиди (*Transparent Conductive Oxides - TCO*). Почевши од Максвелових једначина изведена је дисперзиона релација SPP на раздвојној површини између два материјала са различитим знаковима реалног дела електричне пермитивности, нпр. метал и диелектрик. Дисперзиона релација је касније проширена на вишеслојне метаматеријале (плазмонски кристали) са произвољним бројем слојева. Посебан нагласак је стављен на метаматеријале који садрже периодичне пертурбације у равни простирања SPP, пре свега матрице са прекомерном оптичком трансмисијом (*Extraordinary Optical Transmission Arrays - EOT*). Расејање светлости на плазмонским честицама као и услови постизања резонанције LSP-а су детаљно описани преко квазистатичке апроксимације и Мије теорије у зависности од величине и облика честице.

Трећа глава је посвећена основама квантних полупроводничких инфрацрвених детектора. Приказани су сви параметри детектора (*figures of merit*) и њихово физичко значење тј. како описују перформансе детектора. Описана је оптичка генерација носилаца преко унутрашње квантне ефикасности за фотопроводне и фотонапонске детекторе. Детаљно су разматрани запремински генерационо-рекомбинациони процеси (радијативни, Ожеови и Шокли-Ридови) као и њихов утицај на ниво шума и тиме на перформансе детектора. Посебно су издвојене карактеристике жива кадмијум телурида (HgCdTe) као полупроводничког материјала од посебног значаја за детекцију зрачења у инфрацрвеној области.

У глави четири приказани су основни концепти оптичких метода за побољшање квантних фотодетектора. Посебан акценат је стављен на методе од посебног значаја за дисертацију. Приказане су теоријске основе као и савремена достигнућа везана за антирефлексне слојеве са градијентним профилем индекса преламања. У овој глави су такође описана савремена достигнућа у примени плазмонских честица и ЕОТ матрица за побољшање фотодетектора превасходно за соларне ћелије и видљиви део спектра као и највећи проблеми присутни у померању спектралног одзива плазмонских структура у средњеталасну и дуготаласну ИЦ област.

У петој глави описани су методи пројектовања, моделовања и симулације плазмонских структура намењених побољшању ИЦ детектора. Изложен је метод коначних елемената као и неке појединости везане за рад у програмском пакету COMSOL Multiphysics. Описани су начини дефинисања геометрије структуре, градивних материјала, граничних услова и спољашње побуде, описан је начин дефинисања просторне сегментације односно формирања мреже коначних елемената, оптимизација прорачуна и анализе резултата.

У шестој глави су представљени резултати докторске дисертације. Представљени су резултати нумеричке симулације и оптимизације оптичког одзива плазмонских структура као оптичких концентратора. Прво су приказани резултати за структуру на бази подталасних честица од галијум цинк оксида (GZO) депонованих унутар диелектричног слоја са високим индексом преламања и покривених антирефлексним слојем са градијентним профилем индекса преламања. Детаљно су обрађени утицај антирефлексног слоја на спектралну позицију и интензитет оптичког одзива структуре као и могућности подешавања и оптимизације структуре избором индекса преламања диелектричног слоја, димензија и облика честица. Затим су приказани резултати нумеричке симулације оптичког одзива ЕОТ матрица. Најпре су дати резултати за конвенционалну ЕОТ структуру где је само једна матрица квадратних рупа избушена у танком слоју злата постављеном на површину фотодетектора. Потом је анализирана ЕОТ суперструктура где је додатна матрица квадратних рупа суперпонирана на већ постојећу конвенционалну структуру. Приказане су изузетне могућности подешавања одзива структуре мењањем геометријских параметара ЕОТ матрице као и повећање функционалности суперструктуре у односу на конвенционалну. Приказани су механизми спрезања плазмонских модова ЕОТ матрице са еванесцентним модовима дифракционе решетке и појава оптичких вртлога у активној области фотодетектора директно испод саме ЕОТ матрице. Комбиновањем резултата нумеричке симулације и аналитичког модела фотопроводног HgCdTe израчунат је утицај плазмонских оптичких концентратора на перформансе фотодетектора. Побољшање перформанси се добија директно повећањем спољашње квантне ефикасности детектора као и индиректно смањивањем дебљине активне области која постаје редундантна услед плазмонске локализације и потискивањем г-р шума. Показано је да потискивање шума за последицу има повећање радне температуре плазмонски побољшаних ИЦ детектора.

У седмој глави изложен је закључак, сумирана су научна истраживања обављена приликом рада на дисертацији. Приказани су најбитнији резултати проистекли из овог рада и дате су смернице за будућа истраживања.

Део 8 је списак коришћене литературе.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Дисертација обрађује тематику из уже области плазмонице примењене за побољшање перформанси фотодетектора. Ова област последњих неколико година доживљава процват у свету, при чему је један од њених значајних покретача потреба за јефтинијим и ефикаснијим соларним ћелијама. Број публикација у најреномиранијим светским часописима врло је висок, часописи као *Nature Photonics* објављивали су специјале посвећене овој тематици и може се слободно рећи да је дисертација посвећена једној од тренутно најбитнијих и најтраженијих тема примењене оптоелектронике и нанофотонице. Генерално је област плазмонице, како засноване на металним наночестицама, тако и оне која користи метал-диелектричне нанокомпозите за оптички спектар – плазмонске метаматеријале већ неко време у посебном фокусу светске научне јавности због огромног броја практичних апликација које из ње проистичу.

Постоји већи број већ предложених решења за плазмонско побољшање фотодетектора намењених видљивом спектру. То је са једне стране покретано поменутом потребом за новом генерацијом соларних ћелија, а са друге стране самом природом плазмонских структура, будући да су вредности плазма фреквенције уобичајених метала за плазмонику (злато и сребро) такве да их је најједноставније применити управо у видљивом спектру. Ситуација се потпуно мења са уласком у инфрацрвену област, и поред њеног очигледног практичног интереса (термовизија, топлотно навођење, оптичке комуникације у слободном простору, електроенергетика) и примена плазмонице постаје све проблематичнија са повећањем таласне дужине.

На први поглед делује да је проблем црвеног помака фреквентног спектра фундаменталне природе. Дисертација доказује да то није тако и анализира две оригиналне стратегије за превазилажење проблема повећања црвеног помака радне фреквенције плазмонских структура. Једна од описаних структура заснована је на комбинацији имерзије плазмонских наночестица у диелектрик високе релативне пермитивности и коришћења градијентних антирефлексних слојева, док друга анализира коришћење матрица подталасних рупа са прекомерном оптичком трансмисијом у оптички непрозрачним металним филмовима и формирање оптичких вртлога у њима ради коришћења за оптичку концентрацију у инфрацрвеној области. Предложено је коришћење електромагнетске нелокалности за побољшање ефикасности оптичке концентрације. Можда најбитнији оригинални допринос дисертације представља предлог потискивања фундаметалног генерационо-рекомбинационог шума (пре свега Ожеовог) чисто оптичким путем, што отвара пут према изради нехлађених инфрацрвених детектора са перформансама идентичним конвенционалним направама хлађеним течним азотом.

Као верификација оригиналности истраживања изложених у дисертацији могу послужити радови у међународним часописима који су проистекли из њих (7 чланака класе М20).

Може се закључити да је тематика дисертације истовремено актуелна у научно-истраживачком смислу како на међународном, тако и на националном нивоу, али исто тако и у смислу практичне примене за техничко-технолошке и развојне потребе и решавање конкретних инжењерских проблема.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији су коректно цитирани радови релевантни за њену тематику. Цитиран је већи број научних радова публикованих у последњих пар година. Претрага и цитирање тренутног стања научних истраживања (state of the art) урађени су коректно и без изостављања битних резултата. Укупно је цитирано 94 референци.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе примењене у истраживањима приказаним у оквиру докторске дисертације кандидата Марка Обрадова су укључивале:

- претрага и проучавање релеватне научно-истраживачке литературе посвећене тематици дисертације;
- аналитичко и теоријско разматрање фундаменталних појава везаних за плазмонске материјале (наночестице и наноконтролите) и за инфрацрвене полупроводничке детекторе, као и детаљно истраживање релевантних наноструктура и њихових својстава;
- Примену разнородних научних тематика од интереса за коначни резултат, међу којима су електромагнетна и нумеричка оптика, полупроводничке технологије, инфрацрвена техника, нанонауке и нанотехнологије, оптоелектроника и нанофотоника;
- предлог концепта израде плазмонског концентратора високе ефикасности за средњеталасну инфрацрвену област заснованог на имерзији плазмонских наночестица у диелектрик високе пермитивности;
- предлог новог концепта примене наноплазмонских структура са прекомерном оптичком трансмисијом у оквиру контекста електромагнетне нелокалности и примене композитних подталасних апертура са могућношћу инжењеринга дисперзије променама структуре наноконтролита на дубоком подталасном нивоу;
- развој методе нумеричке симулације структура са плазмонским наночестицама и структурама са прекомерном оптичком трансмисијом методом коначних елемената и превазилажење нумеричких проблема како оних карактеристичних за плазмонику (потреба за великим структурама и врло ситним детаљима) тако и оним специфичним за структуре са просторном нелокалношћу електромагнетних модова и дубоко подталасним детаљима; у ту сврху коришћен је софтверски пакет Comsol Multiphysics;
- симулација и оптимизација оригиналних плазмонских структура применљивих за побољшање инфрацрвених фотодетектора;
- аналитичко, нумеричко, графичко и текстуално приказивање постигнутих резултата, њихова дискусију и анализа у контексту тренутног стања светске науке.

Све наведене научне методе потпуно су адекватне тематици дисертације, одговарају светским стандардима научноистраживачког рада и сагласне су са циљевима постављеним приликом пријаве дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати презентирани у дисертацији представљају резултат разматрања фундаменталних својстава плазмонских честица и нанокмпозита, али са тачке гледишта конкретне применљивости на инфрацрвене детекторе. Због тога је потенцијал за практичну применљивост ових резултата веома велики, како на циљеве зацртане у дисертацији, тако и на већи број других области у којима су ови резултати директно употребљиви.

Основна практична примена је, разуме се, побољшање перформанси инфрацрвених полупроводничких детектора, односно приближавање ономе што је названо „сан инжењера инфрацрвених детектора” – достизању перформанси детектора хлађених течним азотом помоћу нехлађених направа. Ово значи са једне стране смањење цене кроз избегавање скувих, гломазних и непрактичних система за криогено хлађење, а са друге стране појевтињење кроз драматично смањење потршње скупоцених специјалних полупроводничких материјала – уштеде у неким случајевима само на материјалу могле би бити и стотинак пута.

Значајно је да се предложена метода коришћења плазмонских честица за побољшање инфрацрвених детектора може релативно лако применити на већ готове детекторе, односно да отвара могућност за ремонт постојећих, старих и већ коришћених полупроводничких детектора и побољшавање њихове квантне ефикасности и специфичне детективности.

Осим за непосредно обрађивану тематику инфрацрвених фотодетектора, резултати добијени приликом истраживања за ову дисертацију употребљиви су и знатно шире, јер представљају проширење спектралног опсега плазмонице на инфрацрвени спектар. Због тога они могу бити коришћени у оптичким комуникацијама, за израду и побољшавање активних и пасивних оптичких компонента, у трансформационој оптици (суперапсорбери и суперконцентратори, хиперсочива са подталасном резолуцијом), за ултраосетљиве сензоре различитих физичких величина, заправо свуда где је потребна велика локализација електромагнетног поља у инфрацрвеном таласном опсегу.

Практична применљивост резултата дисертације укључује различите области од наменске (нпр. термовизија и топлотно навођење) до индустрије (нпр. провера исправности енергетских трансформатора, даљинско осматрање и сензорика). Поменуто смањење цене због поједностављења конструкције и уштеде у материјалу има потенцијал за проширење примене на већи број области у којима то раније једноставно није било исплативо.

Најзад, значајно је што се значајан део резултата дисертације (нпр. о примени оптичких вртлога) може применити на друга таласна подручја, а свакако најзначајнија област у којој би то било практично употребљиво су фотонапонске соларне ћелије.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Марко Обрадов, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, доказао је радом на овој дисертацији да је научни радник са сопственим интегритетом, високом компетентношћу и талентом, као и потпуну оспособљеност за самосталан научни рад. У оквиру радова за ову дисертацију он је отворио неке нове теме истраживања, квалитетно и конзистентно проверио стање радова у свету и на коректан начин их продужио сопственим оригиналним доприносима. Самостално је дефинисао проблем, препознао главне стратегије његовог превазилажења, осмислио методологију, формирао методе и самостално их имплементирао. Такође је показао велики креативност у нумеричким симулацијама

плазмонских структура, које се сматрају врло тешким за израду и имплементацију, будући да је свака плазмонска структура случај за себе. Разлог томе је то што екстремне концентрације поља подразумевају огромне градијенте, они са своје стране значе веома ситне поделе иначе великих домена и зато са једне стране симулације дуго трају, а са друге стране модел може бити врло нестабилан, тако да чак и модел који сасвим исправно ради за један скуп параметара може постати дивергентан или генерисати артефакте за врло малу између граничних услова или структуре. У светској литератури бројне су референце на ту тему, али је консензус да задовољавајуће решење још не постоји и да зависи од вештине имплементације. Овај проблем је у овом конкретном случају био додатно отежан чињеницом да су се разматрале дубоко подталасне структуре, што је захтевало још ситније поделе и већи опрезност. Кандидат је квалитетно изашао на крај са свим таквим изазовима, систематизовао добијене резултате, извукао исправне закључке и спровео дискусију на високом научно-истраживачком нивоу. Добијени резултати квалитетно су описани и представљају значајан допринос светској науци. Својим радом на дисертацији Марко Обрадов је показао своју компетентност, знање и домишљатост и доказао да је у потпуности способан за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси кандидата Марка Обрадова, мастер инжењера електротехнике и рачунарства приказани у његовој дисертацији укључују:

1. Дефинисана је прва структура на бази плазмонских честица за побољшање фотодетектора у средњеталасној ИЦ области.
2. Предложена је примена антирефлексних слојева са градијентним индексом преламања за оптимално спрезање прстирућег таласа са локализованим површинским плазмонама на честицама уграђеним у диелектрик, што за последицу има могућност практично произвољног подешавања фреквенције плазмонске резонанције честица.
3. Показано је постојање оптималне величине сферних честица за дату конфигурацију и материјал, што за резултат има максимални интензитет плазмонске резонанције.
4. Уведена је додатна могућност подешавања одзива мењањем облика честица односно увођењем сфероидних честица, где се фреквенција и интензитет резонанције могу одвојено подешавати величином полуоса сфероида.
5. Приказано је како се геометрија ЕОТ матрица може модификовати ради додатног побољшања специфичне детективности, што укључује формирање суперструктуре матрица апертура у танком металном филму суперпонирањем више појединачних 2Д матрица.
6. Приказано је формирање оптичких вртлога у активној области детектора депозицијом ЕОТ матрица на површину фотодетектора са могућношћу подешавања спектралне и просторне позиције оптичких вртлога.
7. Показано како се чисто оптичким и пасивним методом може смањити ниво генерационо-рекомбинационог шума у полупроводничким инфрацрвеним детекторима, иако се сматрало да је овај шум фундаменталан и да су неопходне активне методе да би се превазишао.

8. Показано је да се применом метода разматраних у оквиру ове дисертације могу на собној температури постићи перформансе које одговарају направама хлађеним течним азотом.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Основни значај резултата дисертације кандидата Марка Обрадова је у чињеници да је предложио и размотрио две стратегије за померање радних фреквенција плазмонских уређаја из видљивог спектра у инфрацрвену таласну област. Будући да се резонантна фреквенција површинских плазмона поларитона типично налази у ултраљубичастој или видљивој области, то значи да су апликације ограничене на узан опсег радних фреквенција углавном у видљивом спектру. У дисертацији је аналитички и нумерички показано да то не мора бити случај и да постоје једноставне методе да се радне фреквенције прошире на релативно велики опсег већих таласних дужина, тј. да се изврши њихов "црвени помак". До сада је уобичајена метода за то била израда ЕОТ структура за које је неопходна софистицирана литографија са нанометарским резолуцијама. Резултати дисертације показују да је исти циљ могуће достићи знатно једноставније и јефтиније, стохастичким скупинама микро и наночестица од плазмонског материјала утопљеним у диелектрик високе релативне пермитивности. Ово отвара врата бројним новим апликацијама.

Други значајан резултат је да се плазмоника може употребити да чисто оптичким и равнотежним путем смањи генерационо-рекомбинационе процесе у полупроводничким детекторима и с њима повезани шум. То значи да се нехлађеним детекторима могу постићи перформансе хлађених. Ово је веома значајно јер омогућује значајно поједностављење израде детектора и смањење њихове цене. Пошто се исти одзив као у конвенционалним структурама добија многоструко тањим детекторима, онда је и потрошња скупочених полупроводничких материјала (у овом конкретном случају жива кадмијум телурид) знатно мања.

Приликом разматрања примене ЕОТ низова (матрице подталасних апертура са прекомерном оптичком трансмисијом) приказано је формирање оптичких вртлога, односно кружења оптичке енергије у активној области детектора. Ово значи да је могуће пројектовањем параметара ЕОТ низа (геометрија и састав) подешавати положај и спектар вртлога, тако да је тиме могуће оптимизовати плазмонски концентратор за конкретни тип, геометрију и спектралну област ИЦ детектора, што у крајњој последици доводи до нове пројектантске слободе приликом израде детектора и могућности постизања боље квантне ефикасности и специфичне детективности.

Такође приликом разматрања ЕОТ матрица размотрена је могућност коришћења ефеката нелокалности, односно формирања "врућих тачака" оптичког поља увођењем дубоко подталасних детаља – у суштини се ради о примени ефекта шиљака и близинског ефекта на нанометарском нивоу. И последица ове идеје је повећање концентрације поља у активној области ИЦ детектора и тиме побољшања његових перформанси.

Најзад, урађена је анализа побољшања ефикасности дејства плазмонских честица у ИЦ детекторима мењањем њихове геометрије (сфероидни облик уместо сферног). И ово је корак у смеру конзистентног и систематског разматрања могућности повећања концентрације поља и тиме оптимизације перформанси ИЦ детектора.

Посебан квалитет дисертације је у томе што приказане методе чине једну конзистентну целину и што се већина њих може применити и на друге таласне области, укључујући примену на соларне ћелије.

4.3. Верификација научних доприноса

Током истраживања везаних за докторску дисертацију, кандидат Марко Обрадов, мастер инжењер електротехнике и рачуарства, објавио је шест научних радова у међународним часописима са SCI листе (два као првопотписани аутор), односно седам када се урачунају и публикације класе M24 (верификоване специјалном одлуком надлежног матичног одбора). Поред тога, објавио је једанаест радова на конференцијама од међународног значаја и два рада на скуповима од националног значаја. Списак радова је следећи:

Категорија M21:

1. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Vasiljević-Radović, "Plasmonic Suppression of Generation-Recombination Noise in Semiconductor Infrared Detectors," *J. Opt.* 16, pp. 125011.1-10, 2014, doi:10.1088/2040-8978/16/12/125011, ISSN 2040-8978 (IF=2,053, 26/87 in Optics, 2014)

Категорија M22:

2. D. Tanasković, Z. Jakšić, **M. Obradov**, O. Jakšić, "Super unit cells in aperture-based metamaterials", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2015, Article ID 312064, 1-9, Jan 2015, doi: 10.1155/2015/312064, ISSN 1687-4110 (IF=1.644, 122/260 in Materials Science, Multidisciplinary, 2014)

Категорија M23:

1. **M. Obradov**, D. Tanasković, O. Jakšić, D. Vasiljević Radović, "Modifications of spheroid plasmonic particle geometry for enhancement of ultrathin semiconductor infrared detectors" *Optical and Quantum Electronics*, 2016. 48(4): p. 1-7. doi:10.1007/s11082-016-0524-z, ISSN 0306-8919 (IF=0,987, 62/87 in Optics, 2014)
2. D. Tanasković, **M. Obradov**, O. Jakšić, Z. Jakšić, "Nonlocal effects in double fishnet metasurfaces nanostructured at deep subwavelength level as a path towards simultaneous sensing of multiple chemical analytes", *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* vol. 18, pp. 36–42, 2016 doi: 10.1016/j.photonics.2015.12.003, ISSN 1569-4410, (IF=1,474, 45/83 in Optics, 2014)
3. D. Tanasković, **M. Obradov**, O. Jakšić, Z. Jakšić, "A low-loss double fishnet metamaterial based on transparent conductive oxide", *Physica Scripta* vol. T162, art. 014048 pp. 1-4, Sep 2014, doi:10.1088/0031-8949/2014/T162/014047, ISSN 0031-8949 (IF=1.126, 43/78 in Physics, Multidisciplinary, 2014)
4. Z. Jakšić, M. M. Smiljanić, D. Vasiljević Radović, **M. Obradov**, K. Radulović, D. Tanasković, P. Krstajić, "Field localization control in aperture-based plasmonics by Boolean superposition of primitive forms at deep subwavelength scale", *Optical and Quantum Electronics*, 8, 225, pp. 1-7, 2016, doi: 10.1007/s11082-016-0500-7, ISSN 0306-8919 (IF=0,987, 62/87 in Optics, 2014)

Категорија M24:

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, June 2014, doi: 10.2298/FUEE1402183J, ISSN 0353-3670

Категорија М33:

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 Paper Award for oral paper**)
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. 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
5. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Tanasković, "Plasmonic Metamaterial with Fishnet Superlattice for Enhanced Chemical Sensing", Proc. 29th International Conference on Microelectronics MIEL 2014, Belgrade, Serbia, May 12-15, pp. 137-140, ISBN 978-1-4799-5295-3
6. 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 Conf. IcETRAN, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.6.1-5, ISBN 978-86-80509-70-9
7. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Vasiljević-Radović, "Infrared Photodetector Enhancement Utilizing Transparent Conductive Oxide Submicrometer Particles Embedded in Gradient Index Antireflection Layer", Proc. 1st Conf. IcETRAN, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.4.1-6, ISBN 978-86-80509-70-9
8. 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 Conf. IcETRAN, Vrnjačka Banja, June 2 – 5, 2014, pp. MOI2.3.1-5, ISBN 978-86-80509-70-9
9. 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
10. **M. Obradov**, Z. Jakšić, D. Tanasković, "Multipurpose extraordinary optical transmission aperture arrays as optical concentrators for enhancement of mid and long wavelength infrared detectors", Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2015, Silver Lake, Serbia, pp. MOI3.3.1-6, June 8 – 11, 2015, ISBN 978-86-80509-71-6
11. Z. Jakšić, M. M. Smiljanić, Ž. Lazić, K. Radulović, M. Dalarsson, D. Tanasković, **M. Obradov**, O. Jakšić, "Aluminum-based fishnets with complex aperture shapes", Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2015, Silver Lake, Serbia, pp. MOI3.2-1-5, June 8 – 11, 2015, ISBN 978-86-80509-71-6

Категорија M63:

1. **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
2. 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

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Марка Обрадова, мастер инжењера електротехнике и рачуарства, под насловом „**Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора**”, написана је у потпуности у складу са описом и образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе захтеване Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Дисертација представља заокружено и квалитетно научно дело написано у складу са највишим стандардима научноистраживачког рада. Њени главни научни доприноси односе се на тематику плазмоније, метаматеријала и инфрацрвених детектора. У дисертацији су дати предлог и анализа оптичких концентратора на бази плазмонских честица за средњеталасну инфрацрвену област спрегнутих с градијентним антирефлексним слојевима. Овакви концентратори омогућују практично произвољно померање спектралног одзива структуре мењањем индекса преламања диелектричног слоја који окружује плазмонске честице. Оптимизација и фина подешавања интензитета и спектралне зависности плазмонског одзива структуре постижу се мењањем димензија и облика плазмонских честица. Приказано је повећање функционалности ЕОТ матрица суперпонирањем додатне матрице подталасних отвора преко већ постојеће, као и појава оптичких вртлога у оваквим структурама који додатно побољшавају концентрацију поља. Најважнији допринос састоји се у доказивање да је предложеном методом могуће израдити нехлађене инфрацрвене полупроводничке детекторе са карактеристикама детектора хлађених течним азотом, односно да је плазмонском локализацијом оптичког поља у инфрацрвеном спектру, дакле чисто оптичком методом, могуће постићи потискивање генерационо-рекомбинационог шума, пре свега Ожеове компоненте. То представља значајан резултат са великим потенцијалом практичне примене.

Приликом израде дисертације кандидат је показао висок ниво креативности и домишљатости и предложио значајан број нових идеја. Такође је показао упорност и доследност током дуготрајних истраживања која су била неопходна да би се дошло до заокруженог резултата. Дисертација представља конзистентну целину на високом научном нивоу и у себи обједињује теорију, аналитички рад, нумеричке симулације и практичну применљивост. Текст је јасно структуриран и научно коректан, конзистентан и прецизан, а истовремено лак за праћење.

Резултати проистекли из истраживања спроведених у оквиру докторске дисертације објављени су у 6 радова у међународним часописима са SCI листе од чега је кандидат први

аутор на 2, као и у саопштењима на скуповима међународног и националног значаја. Од укупно 20 радова проистеклих из дисертације, кандидат је први аутор на 8.

На основу свега изнесеног, Комисија закључује да је својом докторском дисертацијом Марко Обрадов, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Због тога Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом **„Плазмонске структуре за побољшање полупроводничких инфрацрвених детектора”** кандидата Марка Обрадова, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

[Redacted signature box]

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

[Redacted signature box]

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

[Redacted signature box]

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

[Redacted signature box]

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

[Redacted signature box]

др Владимир Арсоски, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Београд, 21. јун 2016.