

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Ангелине Р. Тотовић**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5013/13-3 од 27. фебруара 2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Ангелине Р. Тотовић** под насловом

„Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама“

„Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks“

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

Ангелина Р. Тотовић је **30. октобра 2013.** године уписала докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул за Наноелектронику и фотонику, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Све испите предвиђене планом докторских студија положила је са највишом оценом.

Кандидат је са уписом докторских академских студија започео истраживачки рад под менторством проф. др Дејана Гвоздића и **30. марта 2017.** године пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама“.

4. априла 2017. 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 Електротехничког факултета је на својој 812. седници одржаној 11. априла 2017. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5013/13-1 од **25.4.2017.** године) у саставу:

- др Јасна Црњански, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Јован Радуновић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Братислав Иричанин, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора је предложен

- др Дејан Гвоздић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације обављена је **9. маја 2017.** године на Електротехничком факултету, пред Комисијом у одсуству ментора. Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољио”.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој 814. седници одржаној 13. јуна 2017. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5013/13-2 од **13.6.2017.** године).

На седници одржаној 11. јула 2017. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Ангелине Р. Тотовић, под насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама” (број одлуке 61206-2530/2-17 од **11.7.2017.** године).

Кандидат је **1. фебруара 2018.** године предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама” („Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks“).

Комисија за студије трећег степена потврдила је **6. фебруара 2018.** године испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

На својој 823. седници одржаној 13. фебруара 2018. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5013/13-3 од **27.2.2018.** године), у саставу

- др Дејан Гвоздић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Јасна Црњански, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Златан Шошкић, редовни професор, Универзитет у Крагујевцу – Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву,
- др Наташа Нешковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Марко Крстић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Физичке електронике за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Именовани ментор дисертације, др Дејан Гвоздић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, активно се бави истраживањем из наведене научне области и из ње има више од 50 публикованих радова у часописима са SCI листе.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ангелина Р. Тотовић рођена је 10. јуна 1988. године у Крагујевцу, где је завршила основну школу и Прву крагујевачку гимназију као носилац Вукове дипломе. Електротехнички факултет у Београду, одсек Физичка електроника, уписала је 2007. године, а дипломирала је јула 2011. године на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику са просечном оценом 9.47. Током студија била је стипендиста Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка, а 2011. године додељена јој је стипендија компаније *Vip Mobile* кроз пројекат „Буди Вип студент“, који је укључивао и

двомесечну стручну праксу. За дипломски рад са основних студија, под називом „Моделовање одзива и динамике носилаца у рефлексионим полупроводничким оптичким појачавачима“, израђен под менторством проф. др Дејана Гвоздића, добила је другу награду на конкурс за најбољи дипломски рад 2011. године, у организацији ЕТФ БАФА (*ETF Belgrade Alumni & Friends Association USA*).

Мастер академске студије уписала је 2011. године на модулу за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, Електротехничког факултета у Београду. Априла 2013. године одбранила је мастер тезу под називом „Самосагласни нумерички метод за прорачун статичких карактеристика полупроводничких оптичких појачавача“, под менторством проф. др Дејана Гвоздића, чиме завршава мастер студије са просечном оценом 10.00 и стиче звање мастер инжењер електротехнике и рачунарства. Докторске академске студије уписала је 2013. године на модулу Наноелектроника и фотоника, Електротехничког факултета у Београду, током којих је положила све испите предвиђене наставним планом и програмом, са просечном оценом 10.00.

Марта 2012. године Ангелина је изабрана у звање сарадника у настави, а фебруара 2014. године у звање асистента за област Физичка електроника, при Катедри за Микроелектронику и техничку физику Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Учествовала је у извођењу наставе у облику аудиторних и лабораторијских вежби у оквиру већег броја предмета из области физичке електронике. Учествовала је у комисијама за одбрану 5 завршних (дипломских) радова. Током своје каријере, објавила је 11 научних радова у часописима са SCI листе, од којих је 6 директно повезано са темом дисертације.

Добитник је награде „Проф. др Илија Стојановић“ Теленор фондације за најбољи научни рад у области телекомуникација 2014. године, као и награде „Александар Маринчић“, 2016. године, коју додељује Удружење за микроталасну технику, технологије и системе, за најбољи научни рад у областима које покрива МТТС удружење. Током октобра 2016. године боравила је на Факултету за Информационо инжењерство, Универзитета у Падови, Италија, у оквиру стипендије *Coimbra* групе. Маја 2017. године добила је стипендију удружења SPIE за усавршавање и истраживање на пољу оптике и фотонике. Члан је OSA и SPIE удружења.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом “Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама” („Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks“) написана је на 149 страна куцаног текста на српском језику, са 44 слике, 8 табела и 150 нумерисаних једначина. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 20. јуна 2016. године. Садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, апстракт на српском (2 стране) и енглеском језику (2 стране), садржај (2 стране), шест поглавља, списак коришћене литературе који обухвата 186 библиографских референци (19 страна), индекс коришћених скраћеница (5 страна), кратку биографију кандидата (1 страна) и Прилоге прописане Упутством за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду (4 стране). Поглавља дисертације су насловљена као:

1. Увод (14 страна)
2. Теоријски модел SOA (41 стране)
3. Дизајн и карактеризација активне области SOA (10 страна)
4. Стационарна анализа SOA (39 страна)
5. Динамичка анализа SOA (39 страна)
6. Закључак (6 страна)

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље тезе полази од економског и технолошког оквира у коме се развој телекомуникација данас одвија, стављајући акценат на важност повећања капацитета и домета линкова и смањење учешћа у глобалној потрошњи електричне енергије. Читалац се уводи у проблематику „уског грла“, које је последица диспропорције капацитета у регионалним и приступним мрежама, укључујући и „последњи километар“ до/од корисника, проузроковане различитим технологијама коришћеним за пренос сигнала, наиме оптичким у првом, односно доминантно радио и електричним у другом случају. Понуђено решење заснива се на пасивним оптичким приступним мрежама, у којима полупроводнички оптички појачавачи представљају један од врло значајних уређаја, захваљујући својој мултифункционалности, једноставности производње и малим димензијама које омогућавају лаку интеграцију са осталим фотонским компонентама. Уводно поглавље садржи преглед примена полупроводничких оптичких појачавача, при чему је посебан акценат стављен на њихову примену у оптичким елементима за рачунарске међувезе и „безбојним“ мрежним јединицама на корисничкој страни у приступним оптичким мрежама.

У другом поглављу дискутовани су структура и принцип рада полупроводничких оптичких појачавача, а затим је извршена њихова класификација према рефлексивности ивица и типу активне области, односно степену конфинирања. Представљени су теоријски модели помоћу којих је могуће одредити све релевантне материјалне и структурне параметре за масивни полупроводник и вишеструке квантне јаме. Дискутована је поларизациона неосетљивост и начини за њено постизање кроз одабир материјала, контролисаног напрезања и геометрије таласовода. Затим је изведен математичко-физички модел полупроводничких оптичких појачавача заснован на једначинама путујућег таласа, написаних по спектралним густинама фотона сигнала и шума и фази сигнала, и брзинским једначинама које описују динамику носилаца у активној области. Извршена је детаљна анализа шума појачане спонтане емисије и његовог моделовања кроз детерминистички и стохастички приступ. Дат је преглед неких од ефеката често занемарених при моделовању полупроводничких оптичких појачавача, а који могу имати значајну улогу у обликовању његових стационарних и динамичких карактеристика, попут дифузије носилаца наелектрисања, нелинеарног потискивања појачања, транспорта носилаца у квантно-конфинираним структурама, температурних ефеката и микроталасне природе струје модулације. Коначно, извршен је преглед доступне литературе која се бави полупроводничким оптичким појачавачима у стационарном и динамичком режиму рада.

У трећем поглављу представљени су резултати нумеричких симулација за одређивање оптичких особина активне области, укључујући материјално појачање, брзину радијативне спонтане рекомбинације и варијације индекса преламања за два типа активних области, масивни InGaAs полупроводник и вишеструке InGaAs/InGaAsP квантне јаме. Дате су смернице за оптимизацију таласовода који обезбеђује поларизациону неосетљивост, на основу којих су дизајнирани гребенасти таласоводи и затим прорачунати параметри који проистичу из њихове геометрије: фактор конфинирања, фактор спрезања спонтане емисије и групна брзина унутар активне области. Сви изведени параметри зависе од концентрације носилаца у активној области и енергије фотона.

Четврто поглавље посвећено је анализи полупроводничких оптичких појачавача у стационарном режиму рада и обухвата два модела различитог нивоа сложености. Најпре је развијен и описан широкопојасни самосагласни нумерички модел, превасходно намењен детаљној свеобухватној анализи и оптимизацији појачавача као самосталног уређаја. Уз модел, развијен је и одговарајући самосагласни итеративни нумерички метод за његову имплементацију. Модел се заснива на спектрално зависним густинама фотона сигнала и шума и обухвата једначину којом се описује еволуција фазе. Сви материјални и геометријски параметри зависе од концентрације носилаца и енергије фотона. Шум појачане спонтане

емисије моделован је детерминистички, кроз одређивање резонантних и антирезонантних учестаности. Еволуција густине фотона шума описана је системом једначина, од којих по један пар одговара једном моду, односно кластеру модова, праћеном редистрибуцијом фотона према преносној функцији резонаторске шупљине. Новоразвијени самосагласни итеративни метод омогућава стабилну конвергенцију алгоритма кроз праћење релативне грешке свих променљивих од интереса и њихово ажурирање помоћу пондерисаних вредности из тренутног и неколико претходних итеративних корака. Анализом нумеричких резултата закључено је да спектралне зависности фактора конфинирања и варијације индекса преламања играју значајну улогу, не само у спектралној дистрибуцији сигнала на излазу, већ и у обликовању стационарног трансмисионог појачања појачавача. Будући да детаљни модел захтева значајне процесорске, меморијске и временске ресурсе, развијен је полу-аналитички стационарни модел применом погодне одабраног скупа апроксимација, као и алгоритам за његову имплементацију заснован на нумерички потпомогнутој Гаусовој методи елиминације променљивих. Полу-аналитички модел заснива се на спрегнутим једначинама по густинама фотона контрапропагирајућих сигнала (са урачунатим доприносом шума) и брзинској једначини написаној по концентрацији носилаца и подразумева сегментацију активне области појачавача на мали број сегмената, не већи од три, на којима се концентрација носилаца сматра константном. У зависности од жељене сложености, модел може укључивати и нелинеарно потискавање појачања. Поређењем резултата полу-аналитичког са широкопојасним самосагласним нумеричким моделом, показано је да се, у зависности од броја сегмената, може постићи поуздана процена трансмисионог појачања појачавача за један до два реда величине краће време, уз одступање које ретко превазилази 1 dB у случају једног сегмента, односно, 0.1 dB у случају три сегмента.

У петом поглављу спроведена је анализа полупроводничких оптичких појачавача у динамичком режиму рада, под модулацијом великим, односно малим сигналимa. Три динамичка модела која су изведена пружају увид у динамичке карактеристике појачавача са различитих аспеката. Најпре је развијен динамички пропагациони модел у 2D домену (време-простор), који урачунава зависности фактора конфинирања и варијације индекса преламања од концентрације носилаца. Нумеричка имплементација спроведена је помоћу „узводне“ шеме засноване на методи коначних разлика. Модел је погодан за анализу произвољних временски зависних оптичких и/или електричних сигнала, при чему може подржати простирање више од једног оптичког канала. Извршена је анализа нумеричких резултата добијених применом пропагационог модела, који обухватају електро-оптичку директну (ре)модулацију константног/RZ/NRZ оптичког помоћу биполарног RZ/NRZ електричног сигнала. Показано је да филтрирање сигнала у електричном домену након ремодулације може обезбедити двосмерни пренос сигнала помоћу истог оптичког носиоца од 10 Gb/s ка и 2.5 Gb/s од крајњег корисника. Затим је изведен и нумерички имплементиран детаљни модел за режим Е/О модулације малим сигналимa, на основу ког је анализиран модулациони одзив и интринсични -3dB пропусни опсег појачавача. Модел посматра струју као путујући микроталас и омогућава урачунавање рефлексије на крајевима електричног вода. Показано је да рефлексиони полупроводнички оптички појачавачи, за разлику од оних заснованих на путујућем таласу, обезбеђују избор између два режима рада са високим пропусним опсегом – несатурирани и у дубокој сатурацији. Показано је да се дужина активне области може оптимизовати тако да се постигне максимум у пропусном опсегу, а, у зависности од режима рада, пропусни опсег може испољити и минимум. Коначно, за брзу процену пропусног опсега у режиму транспаренције, изведен је поједностављени аналитички модел који је квалитативно у високој сагласности са резултатима добијеним путем нумеричког модела.

У последњем, шестом поглављу, дати су закључци и главни доприноси дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Потреба за повећаним капацитетом преноса информација, како на велике, тако и на мале удаљености, намеће примену оптичких технологија свуда где мобилност крајњег корисника није императив. Полазећи од окоснице, преко регионалних мрежа, оптичке технологије спуштају се ка нижим хијерархијским нивоима мрежне архитектуре, са циљем доласка до крајњег корисника у блиској будућности. За остварење овог циља, неопходно је осмислити решења која су економски исплатива и провајдерима услуга и крајњим корисницима, енергетски ефикасна, стандардизована и стога погодна за масовну производњу и једноставна за управљање и одржавање. Једно од решења које нуди одговор на велики број проблема у приступном делу телекомуникационих система данашњице јесу пасивне оптичке мреже (eng. *Passive Optical Networks*, PON). Упарене са технологијом мултиплексирања по таласним дужинама (eng. *Wavelength Division Multiplexing*, WDM), могу обезбедити протоке који се мере у Tb/s по оптичком влакну. Додељивање једног или више канала по кориснику омогућава виртуелну тачка-тачка топологију, економски повољну и једноставну за управљање и одржавање. Основни предуслов за имплементацију WDM-PON у приступним оптичким мрежама јесте обезбеђивање стандардизованих „безбојних“ оптичких мрежних јединица на корисничкој страни. Многа решења која се могу наћи у литератури заснована су на полупроводничким оптичким појачавачима (eng. *Semiconductor Optical Amplifiers*, SOAs), који имају добро дефинисану технологију производње, мале димензије које обезбеђују једноставну интеграцију, мултифункционални су и не захтевају високе струје напајања. Како би се у потпуности искористио потенцијал SOA, најпре је неопходно разумети физичке процесе који се у њему одвијају, укључујући зависности између материјалних и структурних параметара уређаја, радног режима и параметара коришћених за квантификовање квалитета појачавача. Детаљна анализа SOA отвара могућност за њихову оптимизацију и даје увид у фундаментална ограничења уређаја.

Предмет проучавања ове докторске дисертације управо су полупроводнички оптички појачавачи, како рефлексионни (eng. *Reflective SOA*, RSOA), тако и они засновани на путујућем таласу (eng. *Traveling-Wave SOA*, TW-SOA), у оба режима рада од интереса – стационарном и динамичком, помоћу нумеричких модела прилагођених детаљној анализи и оптимизацији појединачних уређаја, али и аналитичких и полу-аналитичких модела, који омогућавају брзу и једноставну процену перформанси SOA у сложеним комуникационим системима. Стога се ова дисертација бави једним од врло значајних проблема данашњице и оријентисана је ка разумевању могућности које SOA нуди и пружању смерница за унапређење његових карактеристика. Све већа заинтересованост истраживача и индустрије за манипулацијом сигнаlima у оптичком домену, недавно је поставила полупроводничке оптичке појачаваче поново у фокус истраживања, овога пута не у својој основној функцији појачавача, већ као саставни део фотонских кола намењених обради сигнала – почев од (ре)модулатора и оптичких чворишта за унакрсно повезивање, преко извора на бази влакна у којима RSOA игра улогу активног огледала, до комутатора, оптичких логичких кола, конвертора таласних дужина и сл. Заједничко за све моделе, укључујући и оне намењене анализи нелинеарности, јесте да су управо изграђени на основу фундаменталног модела SOA, чинећи да разумевање фундаменталних особина буде кључна основа за примену појачавача.

Оригиналност теме докторске дисертације огледа се кроз неколико релевантних резултата. Најпре, спроведена је детаљна анализа RSOA у стационарном и динамичком режиму рада, који, за разлику од TW-SOA, није адекватно заступљен у литератури теоријског карактера, иако се у многим применама експериментално показао као бољи избор од TW-SOA. Резултати анализе оба типа појачавача у стационарном режиму рада показали су значај оптимизације фактора конфинирања и варијације индекса преламања са инјекцијом

носилаца, не само на радној таласној дужини, већ и на целом опсегу на ком се очекује значајан шум. Тиме је показано да модели доступни у литератури, који су махом засновани на константном фактору конфинирања и/или урачунавању фазне модулације путем фактора проширења линије не могу увек адекватно описати SOA. Пружено је теоријско образложење ефекта раније примећеног експериментално, наиме премашаја стационарног трансмисионог појачања код RSOA на уласку у сатурациони режим рада за високе струје, који се може објаснити дисбалансом између зависности брзине радијативне спонтане рекомбинације и материјалног појачања од концентрације носилаца. Анализом RSOA као електро-оптичког ремодулатора у „безбојним“ оптичким мрежним јединицама на корисничкој страни показано је да се може вршити бидирекциони пренос између централе и корисника путем истог оптичког носиоца са битским брзинама које достижу 10 Gb/s ка, односно 2.5 Gb/s од корисника, уколико се филтрирањем у електричном домену потисну више фреквенције које потичу од интензитетске модулације долазног сигнала. Третирањем модулационе струје као путујућег микроталаса, показано је да микроталаси који путују у оба смера обликују модулациони одзив појачавача. Модели присутни у литератури, у којима се претпоставља да струја тренутно постиже униформну расподелу дуж микротракасте електроде, нису у могућности да адекватно опишу динамичке карактеристике појачавача у случајевима значајне рефлексије микроталаса на крају електричног вода, или неусклађених брзина електричних и оптичких таласа. Анализа резултата у динамичком режиму рада, резултовала је откривањем два максимума у зависности пропусног опсега од снаге улазног оптичког сигнала код RSOA, који не постоје код TW-SOA, што отвара могућност избора између два радна режима. Додатно, примећена је снажна зависност интринсичног -3dB пропусног опсега од дужине активне области код оба типа појачавача. Квантитативни резултати показују да ограничење у пропусном опсегу најчешће не потиче од самог уређаја, како резултати у доступној литератури предвиђају, већ од паразитних ефеката транспорта носилаца и паковања појачавача. Стога се фокус оптимизације премешта са избора материјала активне области и геометрије таласовода на минимизацију паразитних ефеката.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе коју је кандидат навео у дисертацији показује да је кандидат детаљно анализирао постојећу литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је 186 библиографских референци. Литература садржи велики број недавно објављених радова из високо-реномираних часописа који су уско везани за разматрану тему, што сведочи о актуелности и значају истраживања. Поред радова других аутора, у листи референци налази се 8 ауторских и коауторских радова самог кандидата.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе које су примењене у тези теоријског су карактера.

- Детаљни модел пропагације оптичких сигнала кроз полупроводничке оптичке појачаваче изведен је полазећи од система парцијалних диференцијалних једначина написаних по нормираним анVELOпама електричних поља контрапропагирајућих сигнала, да би затим био преведен у систем једначина који описује еволуцију контрапропагирајућих густина фотона сигнала и њима придружених фаза сигнала. Коначно, систем једначина по сигнаlima преведен је у свој спектрално зависни облик. У систем је укључено и нелинеарно потискивање појачања које феноменолошки урачунава ефекте прогоревања спектра и загревања носилаца. Динамика носилаца моделована је брзинском једначином која препознаје радијативну и нерадијативну спонтану рекомбинацију и стимулисану емисију.
- Шум појачане спонтане емисије моделован је детерминистички узимајући у обзир резонаторско својство појачавача. При имплементацији модела, фотони шума који

припадају опсегу између две суседне антирезонанције посматрани су кроз своју густину фотона центрирану на резонантној учестаности, а затим прерасподељени према преносној функцији резонатора. У циљу повећања ефикасности, неколико суседних модова груписано је у кластере, који садрже не више од 5 суседних модова.

- Материјални и структурни параметри активне области испољавају зависност од концентрације носилаца у активној области и енергије фотона и изведени су полазећи од детаљних зонских модела (двостонски и вишестонски) коришћених полупроводничких материјала, односно структура, и геометрије таласовода у трансверзалној равни.
- При формирању детаљног динамичког нумеричког модела малих сигнала, струја модулације третирана је као дистрибуирана, односно, као путујући микроталас дуж микротракасте електроде. У модел је урачуната рефлексивност микроталаса на крајевима електричног вода. Остављена је могућност урачунавања слабљења микроталаса приликом простирања.
- Модел директне Е/О модулације изведен је служећи се формализмом малих сигнала и занемарујући све брзопроменљиве компоненте, односно мале величине реда већег од један.

Поред набројаних теоријских метода, коришћене су и нумеричке методе помоћу којих су теоријски модели имплементирани:

- За потребе имплементације широкопојасног стационарног модела, развијен је уопштени самосагласни итеративни нумерички поступак са контролом релативног одступања између два суседна итеративна корака за све променљиве од интереса и у свакој тачки 2D просторно-спектралне мреже. Ажурирање променљивих спроведено је на основу тренутног и више претходних итеративних корака, уз погодно одабран скуп тежинских фактора, чиме је постигнута стабилна конвергенција алгорита. Пропагација сигнала моделована је путем методе коначних разлика.
- Полу-аналитички стационарни модел имплементиран је сегментацијом активне области на мали број еквидистантних сегмената на којима је концентрација носилаца константна и једнака аритметичкој средини концентрација на ивицама сегмената. Систем спрегнутих трансцендентних једначина по концентрацијама носилаца решаван је нумерички потпомогнутом Гаусовом методом елиминације променљивих, развијеном за потребе имплементације модела.
- Динамички пропагациони модел имплементиран је уз помоћ „узводне“ шеме првог реда која се ослања на методу коначних разлика, а у којој се просторна и временска оса третирају као квази-континуалне кроз фини сегментацију. Сегментација је извршена према Курант-Фридрихс-Леви критеријуму стабилности.
- Детаљни динамички модел малих сигнала, који подразумева решавање контурног проблема који обухвата четири спрегнуте диференцијалне једначине првог реда са функционалним коефицијентима у случају RSOA, решен је методом коначних разлика са имплементираном тростепеностом Лобато IIIA формулом. У случају TW-SOA систем се редукује на пар диференцијалних једначина које нису спрегнуте, те су решене нумеричком интеграцијом.

Теоријске и нумеричке методе показале су се адекватним што је потврђено кроз резултате нумеричких симулација и аналитичких модела, који са високом сагласношћу описују експерименталне резултате доступне у литератури.

3.4. Применљивост остварених резултата

Као што је поменуто у секцији 3.1, разумевање фундаменталних принципа на којима се заснива рад полупроводничких оптичких појачавача представља основу за њихову примену у

савременим приступним мрежама и сложеним фотонским системима. Резултати ове дисертације управо нуде математичко-физичке моделе и нумеричке алгоритме за њихову имплементацију, који се могу користити за детаљну анализу појачавача у случају оптимизације појединачних уређаја, односно за брзу процену њихових стационарних и динамичких особина када се врши оптимизација система који укључује појачаваче. Посебан допринос представља детаљни модел рефлексионих полупроводничких оптичких појачавача, који до сада нису били адекватно заступљени у литератури теоријског карактера. Стационарни модели, који омогућавају одређивање трансмисионог појачања, просторне дистрибуције концентрације носилаца и фотона дуж активне области и спектралне расподеле сигнала и шума на излазу из појачавача, намењени су превасходно разумевању појачавачких карактеристика полупроводничких оптичких појачавача у системима са једним или више оптичких носилаца, попут WDM-PON. Динамички модели, са друге стране, представљају користан алат када се полупроводнички оптички појачавачи користе у сврхе које превазилазе једноставно појачање, попут Е/О (ре)модулатора, О/О прекидача, конвертора таласних дужина, или као део сложених уређаја, попут ласера заснованог на влакну или оптичког предајника сложених модулационих формата. Коначно, полу-аналитички и аналитички модели развијени у овој дисертацији могу се ефикасно имплементирати у софтвере за анализу сложених фотонских система где ниско заузеће процесорских и меморијских ресурса представља императив. Цитираност радова проистеклих из ове дисертације (13 без аутоцитата) показује да су модели нашли примену.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кроз реализацију докторске дисертације, кандидат је у потпуности демонстрирао све релевантне способности за самосталан научно-истраживачки рад. На првом месту, кандидат је препознао значај и атрактивност теме, и врло зрело приступио њеној разради кроз анализу оба радна режима. Определивање да кроз дисертацију прикаже детаљне нумеричке моделе, али и њихове поједностављене аналитичке верзије, показује да кандидат препознаје захтеве како научне заједнице, тако и индустрије, и да је успешно одговорио на оба. Литература коју је приложио обухвата и фундаменталне, али и савремене радове из теме дисертације, што говори о њеном систематичном и пажљивом избору. Циљеви дисертације јасно су изложени, математичко-физички модели обухватају све релевантне ефекте, а теоријске и нумеричке методе коришћене за спровођење истраживања јасно су дефинисане и детаљно образложене и приказане у дисертацији. Кандидат је успешно осмислио неколико оригиналних нумеричких метода за имплементацију формулисаних модела, а показао и истраживачку зрелост приликом одабира апроксимација које могу обезбедити аналитичке или полу-аналитичке моделе. Сви алгоритми и програмски кодови ефикасни су, робусни и поуздани, што показују резултати нумеричких симулација и прорачуна. Алгоритми су модуларни и намењени анализи произвољног типа уређаја, једноставним подешавањем вредности параметара, чиме је олакшана њихова употреба, али и повећан опсег примена. Анализа и дискусија резултата спроведена је јасно и детаљно, а закључци изнети недвосмислено, што се може видети и у објављеним радовима кандидата. Закључци дисертације показују висок ниво спремности кандидата да препозна квалитете, предности и недостатке, као и ограничења постављеног модела и да јасно и уверљиво представи најважније доприносе свог истраживања, уз конкретно и уопштено сагледавање последица резултата проистеклих из тезе, што потврђује да је кандидат спреман и способан да сам или у тиму убудуће компетентно обавља научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси који су остварени у тези су следећи:

- Развијен је детаљни широкопојасни стационарни модел SOA који контрапропагирајуће сигнале и шум третира путем спектралних густина фотона. Модел укључује детаљне, нумерички одређене зависности свих релевантних материјалних и структурних параметара SOA од густине носилаца у активној области и енергије фотона. Еволуција фазе моделује се путем варијације индекса преламања услед инјекције носилаца, чиме је избегнуто апроксимативно моделовање кроз фактор проширења линије.
- Формиран је широкопојасни детерминистички модел шума појачане спонтане емисије заснован на спектралним зависностима материјалних и структурних параметара SOA, који препознаје присуство резонаторске шупљине кроз резонанције и антирезонанције у спектру на излазу из појачавача. Показано је да резонантне учестаности зависе од концентрације носилаца у активној области, те да се у динамичком режиму рада очекује њихова промена током времена.
- Осмишљен је самосагласни итеративни поступак, погодан за анализу произвољног типа појачавача, заснован на методи коначних разлика за нумеричко решавање система једначина широкопојасног стационарног модела.
- Развијен је полу-аналитички стационарни модел SOA заснован на сегментацији активне области дуж лонгитудиналне координате на мали број сегмената, који може урачунавати и нелинеарно потискивање појачања. Осмишљен је алгоритам заснован на нумерички потпомогнутој Гаусовој методи елиминације променљивих за нумеричко решавање једначина полу-аналитичког модела SOA. Алгоритам обезбеђује један до два реда величине бржу процену трансмисионог појачања у поређењу са детаљним нумеричким поступком.
- Развијен је динамички пропагациони модел за велике сигнале заснован на решавању система временски зависних спрегнутих парцијалних диференцијалних једначина уз помоћ „узводне“ шеме засноване на методи коначних разлика. Модел се може проширити тако да обухвати више засебних једначина по сигнаlima на различитим таласним дужинама.
- Развијен је детаљни нумерички модел малих сигнала заснован на струји као путујућем микроталасу дуж тракасте електроде. Модел струје је бидирекциони и препознаје рефлексију микроталаса на крају електричног вода. Показано је да за типичне модулационе фреквенције нема значајне квалитативне разлике у модулационом одзиву између модела струје као униформне и путујућег микроталаса, док год су импедансе упарене, а брзине електричног и оптичког таласа усклађене.
- Развијен је аналитички модел за одређивање модулационог одзива и процену одговарајућег пропусног опсега за TW- и RSOA у режиму транспаренције. Аналитички изрази квалитативно одговарају резултатима добијеним путем поједностављеног нумеричког модела, иако квантитативно може доћи до одступања.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева истраживања, постављених хипотеза и остварених резултата, Комисија са задовољством може да констатује да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из проблематике којом се дисертација бави.

Наведени научни доприноси тезе представљају значајне кораке у погледу разумевања функционисања, карактеризације и конкретне примене полупроводничких оптичких појачавача, не само у приступним оптичким мрежама, већ и у другим фотонским системима.

Кључна открића до којих се дошло у овој дисертацији, а која дефинишу напредак у односу на већ постојећа сазнања, су следећа:

- Уочен је премашај стационарног трансмисионог појачања RSOA са активном облашћу заснованом на масивном полупроводнику, које, на уласку у сатурациони режим рада може превазилазити вредност несатурираног трансмисионог појачања. Постојање премашаја експериментално је потврђено и документовано у доступној литератури. Показује се да до овог ефекта доводи неравнотежа између наглог пада снаге шума појачане спонтане емисије са смањењем концентрације носилаца и релативно спорог пада материјалног појачања на радној таласној дужини.
- Уочен је значајан утицај варијације индекса преламања са инјекцијом носилаца на стационарно трансмисионо појачање SOA. Слично, показано је да спектрална зависност фактора конфинирања игра важну улогу у обликовању трансмисионог појачања, посебно уколико се SOA анализира за широкопојасне примене.
- Анализирана је примена TW- и RSOA у електро-оптичкој модулацији биполарним RZ и NRZ модулационим форматом струје. Показано је да поред интензитетске модулације, сигнал трпи и фазну модулацију и то тако да је у фазу утиснута инверзна поворка битова у поређењу са модулационом струјом. За потискивање фазне модулације, предложен је избор адекватне дубине модулације струје којом се постиже разлика између логичких нивоа нуле и јединице фазе од 2π .
- Показано је да RSOA за умерене оптичке снаге улазног сигнала испољава боље модулационе карактеристике од TW-SOA. Слично, поређењем активних области заснованих на масивном полупроводнику и вишеструким квантним јамама, показано је да, за материјале анализирани у овој дисертацији, балк SOA испољава боље модулационе карактеристике. Установљено је да се модулационе карактеристике могу побољшати повећањем дужине активне области, повећањем густине струје поларизације, повећањем оптичке снаге улазног сигнала, док дубина модулације не утиче значајно на дијаграм ока излазног оптичког сигнала.
- Анализирана је примена TW- и RSOA у електро-оптичкој ремодулацији претходно интензитетски модулисаног оптичког сигнала. Показано је да се филтрирањем сигнала у електричном домену и потискивањем фреквенција на којима је долазни сигнал био модулисан, може значајно побољшати квалитет ремодулисаног сигнала. Потврђено је да ремодулација може да се обави чак и у случају само 4 пута нижег битског протока у смеру од корисника, у односу на битски проток у смеру ка кориснику. Поређењем различитих модулационих формата, показано је да ремодулација претходно интензитетски модулисаног оптичког сигнала биполарним RZ форматом обезбеђује боље резултате од ремодулације NRZ модулисаног сигнала.
- Показано је да у случају отвореног кола, микроталаси који путују у различитим смеровима имају приближно исти допринос приликом инјекције носилаца, те је неопходно урачунати оба приликом анализе модулационог одзива. Са друге стране, гранична учестаност не мења се приметно у случају отвореног кола у поређењу са случајем упарених импеданси.
- Показано је да RSOA има значајно другачију зависност пропусног опсега од радних услова у поређењу са TW-SOA. Док је у случају TW-SOA пропусни опсег максималан за високе снаге и високе струје, код RSOA се јављају два максимума у односу на оптичку снагу улазног сигнала, те се може бирати између два режима рада – једног у дубокој сатурацији и другог за умерене упадне оптичке снаге.
- Показано је да се у зависности од дужине активне области могу јавити екстремуми у -3dB пропусном опсегу, како код TW-, тако и код RSOA, чиме се отвара могућност оптимизације дужине активне области према одабраним радним условима. Минимуми се јављају у случају малих дужина активних области, док су максимуми испољени код RSOA за дужине активних области од приближно 1 mm.

Полазећи од свега наведеног, може се закључити да резултати које је постигао кандидат дају чврст оквир и основу за препознавање овог рада као квалитетне докторске дисертације.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су следећим радовима:

Категорија M14 (Поглавље у књизи M12 – монографија међународног значаја):

1. **Totović, A.R., Gvozdić D.M.:** *Traveling-Wave and Reflective Semiconductor Optical Amplifiers*, Chapter 21 in *Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation: Fundamentals, Materials, Nanostructures, LEDs, and Amplifiers, Vol. 1*, Ed. Joachim Piprek, pp. 631–696, CRC Press, Oct, 2017. (ISBN 9781498749466)

Категорија M21a (Рад у врхунском међународном часопису):

2. Gvozdić, D.M., **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gebrewold, S.A., Leuthold, J., Mašanović, M.L.: *Self-seeded RSOA fiber cavity laser and the role of Rayleigh backscattering – An analytical model*, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 22, pp. 4845–4850, 2017. (ISSN 0733-8724, **IF 3.671**, doi: 10.1109/JLT.2017.2758724)
3. **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *Numerical study of the small-signal modulation bandwidth of reflective and traveling-wave SOAs*, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 13, pp. 2758-2764, 2015. (ISSN 0733-8724, **IF 2.567**, doi: 10.1109/JLT.2015.2412252)
4. **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *An efficient semi-analytical method for modeling of traveling-wave and reflective SOAs*, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 11, pp. 2106–2112, 2014. (ISSN 0733-8724, **IF 2.965**, doi: 10.1109/JLT.2014.2317478)
5. **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Mašanović, M.L., Gvozdić, D.M.: *A self-consistent numerical method for calculation of steady-state characteristics of traveling-wave and reflective SOAs*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 3000411(1–11), 2013. (ISSN 1077-260X, **IF 3.465**, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2263118)

Категорија M22 (Рад у истакнутом међународном часопису):

6. **Totović, A.R.**, Levajac, V.G., Gvozdić, D.M.: *Electro-optical modulation bandwidth analysis for traveling-wave and reflective semiconductor optical amplifiers in transparency operating regime*, Optical and Quantum Electronics, vol. 48, no. 4, pp. 262 (1–9), 2016. (ISSN 0306-8919, **IF 1.055**, doi: 10.1007/s11082-016-0534-x)
7. Gebrewold, S.A., Bonjour, R., Barbet, S., Maho, A., Brenot, R., Chancelou, P., Brunero, M., Marazzi, L., Parolari, P., **Totovic, A.**, Gvozdic, D., Hillerkuss, D., Hafner, C., Leuthold, J.: *Self-seeded RSOA-fiber cavity lasers vs. ASE spectrum-sliced or externally seeded transmitters—A comparative study*, Applied Sciences, vol. 5, no. 4, pp. 1922-1941, 2015. (ISSN 2076-3417, **IF 1.726**, doi: 10.3390/app5041922)
8. **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *An analytical solution for stationary distribution of photon density in traveling-wave and reflective SOAs*, Physica Scripta, vol. 2014, no. T162, pp. 014013(1–5), Sept. 2014. (ISSN 0031-8949, **IF 1.126**, doi: 10.1088/0031-8949/2014/T162/014013)
9. **Totović, A.R.**, Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *Modeling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers*, Physica Scripta, vol. 2012, no. T149, pp. 014032–014036, 2012. (ISSN 0031-8949, **IF 1.032**, doi: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014032)

Категорија М33 (Саопштење са међународног скупа штампано у целини):

10. Totović, A.R., Gvozdić, D.M., Santagiustina, M., Antonelli, C., Parolari, P., Boffi, P.: *Feasibility analysis of a 4-QAM colorless transmitter based on two RSOAs*, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2017), June 25th – 29th, 2017, Paper CI-4.2, IEEE, Munich, Germany, Jun, 2017. (ISBN 978-1-5090-6736-7, doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8086941)

Категорија М34 (Саопштење са међународног скупа штампано у изводу):

11. Totović, A.R., Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *Quiescent points of self-seeded RSOA-FCL with Rayleigh backscattering feedback*, 6th International School and Conference on Photonics (Photonica 2017), August 28th – September 1st, 2017, Book of Abstracts 149, Institute of Physics Belgrade, Belgrade, Serbia, 2017. (ISBN 978-86-82441-46-5)
12. Levajac, V.G., Totović, A.R., Gvozdić, D.M., *Electro-optical modulation bandwidth analysis for traveling-wave and reflective semiconductor optical amplifiers*, 5th International School and Conference on Photonics (Photonica 2015), August 24th – 28th, 2015, Book of Abstract 164, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Beograd, Srbija, 2015. (ISBN 978-86-7306-131-3)
13. Totović, A.R., Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M.: *Analytical solution for stationary distribution of photon density in traveling-wave and reflective semiconductor optical amplifiers*, 4th International School and Conference on Photonics (Photonica 2013), August 26th – 30th, 2013, Book of Abstract 116, Institute of Physics Belgrade, Beograd, Srbija, 2013. (ISBN 978-86-82441-36-6)
14. Totović, A.R., Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M., *Modeling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers*, 3rd International School and Conference on Photonics (Photonica 2011), August 29th – September 2nd, 2011, Book of Abstract 130, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Beograd, Srbija, 2011. (ISBN 978-86-7306-110-8)

Категорија М50 (Радови у часописима националног значаја):

15. Totović, A.R., Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., Gvozdić, D.M., *Application of multi-quantum well RSOA in remodulation of 100 Gb/s downstream RZ signal for 10 Gb/s upstream transmission*, Proceedings of the 19th Telecommunications Forum (TELFOR 2011), November 22nd – 24th, 2011, pp. 840–843, IEEE, Beograd, Srbija, 2011. (ISBN 978-1-4577-1499-3, doi: 10.1109/TELFOR.2011.6143675)

Доприноси објављени у референцама [1], [3]-[6], [8]-[9] и [12]-[15] представљају део основних резултата истраживања који су изложени у докторској дисертацији кандидата. Ти доприноси употпуњени су резултатима који до сада нису објављени.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу приложеног, Комисија констатује да докторска дисертација Ангелине Р. Тотовић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама” („Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks“), испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација Ангелине Р. Тотовић садржи научне доприносе који се састоје у развоју модела, као и аналитичких и нумеричких метода са придруженим алгоритмима за њихову имплементацију, намењених моделовању полупроводничких оптичких појачавача, како рефлексионих, тако и оних заснованих на путујућем таласу, у стационарном и динамичком режиму рада за велике и мале сигнале. Модели се могу применити на

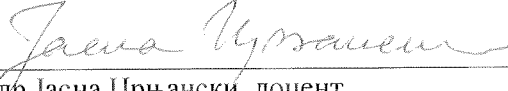
самостални уређај, или уређај као део сложенијег система. Резултати проистекли из представљених модела употпуњени су смерницама за оптимизацију параметара појачавача и избор адекватног радног режима како би се постигле максималне перформансе уређаја. Главни резултати истраживања приказани су у поглављу у монографији међународног значаја, референца [1] (категорија M14, где је кандидат првопотписани), односно у радовима објављеним у међународним часописима са SCI листе, референце [3]-[6] и [8]-[9] (три рада из категорије M21a и три из категорије M22, од којих је кандидат на свим првопотписани аутор). Додатна истраживања на основу развијених модела, приказана су у референцама [2], [7] и [10] (један рад из категорије M21a, један из категорије M22 и један из категорије M33, од којих је на последњем кандидат првопотписани). Током израде докторске дисертације кандидат је показао несумњиву способност за самостални научно-истраживачки рад.

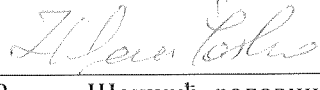
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „**Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама**“ („**Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks**“) кандидата Ангелине Р. Тотовић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

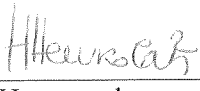
Београд, 26.03.2018. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Дејан Гвоздић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Јасна Црњански, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Златан Шошкић, редовни професор
Универзитет у Крагујевцу – Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву


др Наташа Нешковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Марко Крстић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет