

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата дипл. инж. ел. – магст. **Ангелине Тотовић** за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5013/13-1 од 25.04.2017. донетој на седници Наставно-научног већа бр. 812, Електротехничког факултета Универзитета у Београду од 11.04.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Ангелине Тотовић** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама“**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ангелина Р. Тотовић рођена је 10. јуна 1988. године у Крагујевцу, где је завршила основну школу као носилац Вукове дипломе и ученик генерације, 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 рефлексивним полупроводничким оптичким појачавачима“, 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“, чиме завршава мастер студије са просечном оценом 10.00 и стиче звање мастер инжењер електротехнике. Докторске 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.

Поседује активно знање енглеског језика, а служи се немачким и шпанским. Члан је Оптичког друштва Србије, OSA и SPIE удружења.

Запослење и стручне активности

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. Током свог досадашњег рада на Електротехничком факултету у Београду, интензивно је учествовала у настави на Катедри за Микроелектронику и техничку физику. Остварила је веома успешну сарадњу са члановима Катедре, показала изражену способност за наставно-педагошки рад, посебно савесност и одговорност у раду и остварила успешан контакт са студентима.

Учествовала је у извођењу наставе у облику аудиторних и лабораторијских вежби у оквиру већег броја предмета из области физичке електронике. Вежбе су добро прихваћене од стране студената што показује и просечна оцена на студентским анкетама од 4.57 у протекле три године. Поред извођења наставе, Ангелина је учествовала у осмишљавању нових и унапређењу већ постојећих материјала за аудиторне и лабораторијске вежбе. Учествовала је у комисијама за одбрану 5 завршних (дипломских) радова.

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 унапређивање и истраживање на пољу оптике и фотонице.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске студије

Кандидат Ангелина Тотовић уписана је на докторске студије школске 2013/14. год. Ангелина је испунила све обавезе и положила све испите предвиђене планом и програмом докторских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, са просечном оценом 10. Списак положених предмета дат је у наставку.

1. Пројектовање интегрисаних кола (9 ЕСПБ)
2. Моделовање полупроводничких ласера (9 ЕСПБ)
3. Моделовање наноструктура (9 ЕСПБ)
4. Фотонске комуникације (9 ЕСПБ)
5. Нумеричка анализа (9 ЕСПБ)
6. Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници (9 ЕСПБ)
7. Нелинеарна оптика (9 ЕСПБ)
8. Модерне фотонске компоненте и системи (9 ЕСПБ)
9. Енглески језик (9 ЕСПБ)
10. Оптиелектронске мерне методе (9 ЕСПБ)

На јавној усменој одбрани предложене теме, одржаној 09.05.2017. године, Комисија у саставу:

1. др Јасна Црњански, доцент, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
2. др Јован Радуновић, редовни професор у пензији, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
3. др Братислав Иричанин, доцент, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

закључила је да је кандидат добио оцену **задовољно** и да испуњава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

Наставно ангажовање

Током свог досадашњег рада на Електротехничком факултету, кандидат је учествовао у извођењу наставе у облику аудиторних и лабораторијских вежби у оквиру већег броја предмета:

1. Физика 1 (аудиторне вежбе, од школске године 2013/14)
2. Лабораторијске вежбе из физике (лабораторијске вежбе, од школске године 2012/13)
3. Физика (СИ) (аудиторне и лабораторијске вежбе, од школске године 2013/14)
4. Практикум из физике 2 (лабораторијске вежбе, од школске године 2011/12)
5. Физика 2 (аудиторне вежбе, од школске године 2013/14)
6. Основи физичке електронике (аудиторне вежбе, од школске године 2014/15)
7. Елементи електронских уређаја (лабораторијске вежбе, од школске године 2012/13)
8. Оптичке телекомуникације (Оптоелектронске телекомуникационе компоненте) (лабораторијске вежбе, од школске године 2011/12)
9. Оптоелектроника (аудиторне и лабораторијске вежбе, од школске године 2013/14)
10. Сензори и претварачи (лабораторијске вежбе, од школске године 2012/13)
11. Ласерска техника (аудиторне и лабораторијске вежбе, од школске године 2013/14)
12. Оптичке телекомуникације 2 (Оптоелектронски телекомуникациони подсистеми) (аудиторне вежбе, од школске године 2014/15)
13. Анализа и моделовање полупроводничких направа (аудиторне вежбе, од школске године 2012/13)

Учествовала је у комисијама за одбрану 5 завршних (дипломских) радова.

Научна каријера

Кандидат Ангелина Тотовић је аутор или коаутор 10 радова у часописима од међународног значаја (са *impact* фактором), 4 рада саопштена на међународним скуповима штампана у изводу и 2 рада саопштена на националном скупу штампана у целини:

Категорија M20 (Радови објављени у научним часописима међународног значаја):

Категорија M21:

1. Krstić, M.M., Crnjanski, J.V., **Totović, A.R.**, Gvozdić, D.M.: *Switching of bistable injection-locked Fabry-Pérot laser by frequency detuning variation*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 21, no. 6, pp. 1801509 (1–9), 2015. (ISSN 1077-260X, **IF 3.466**, doi: 10.1109/JSTQE.2015.2451103)
2. Topić, V.J., Crnjanski, J.V., Krstić, M.M., **Totović, A.R.**, Gvozdić, D.M.: *Analytical method for calculation of the photon lifetime and external coupling coefficient in index-coupled phase-shifted DFB lasers*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 21, no. 6, pp. 1503209 (1–9), 2015. (ISSN 1077-260X, **IF 3.466**, doi: 10.1109/JSTQE.2015.2445493)
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 1558-2213, **IF 2.567**, 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. 1–11, 2013. (ISSN 1077-260X, **IF 4.078**, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2263118)

Категорија M22:

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 1572-817X, **IF 0.987**, 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. Krstić, M.M., Crnjanski, J.V., **Totović, A.R.**, Gvozdić, D.M.: *Comparison of switching times in optically bistable injection-locked semiconductor lasers*, Physica Scripta, vol. 2014, no. T162, pp. 014036(5), Sept. 2014. (ISSN 0031-8949, **IF 1.126**, doi: 10.1088/0031-8949/2014/T162/014036)
9. **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(5), Sept. 2014. (ISSN 0031-8949, **IF 1.126**, doi: 10.1088/0031-8949/2014/T162/014013)
10. **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 1.204**, doi: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014032)

Категорија M34 (Саопштење са међународног скупа штампано у изводу):

11. 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 24 – 28, 2015, Book of Abstract 164, Beograd, Srbija, 2015. (ISBN 978-86-7306-131-3)
12. **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 26 – 30, 2013, Book of Abstract 116, Beograd, Srbija, 2013. (ISBN 978-86-82441-36-6)
13. Krstić, M.M., Crnjanski, J.V., **Totović, A.R.**, Gvozdić, D.M.: *Comparison of switching times in optically bistable injection-locked semiconductor lasers*, 4th International School and Conference on Photonics (Photonica 2013), August 26 – 30, 2013, Book of Abstract 78, 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 29 – September 2, 2011, Book of Abstract 130, Beograd, Srbija, 2011. (ISBN 978-86-7306-110-8)

Категорија M50 (Радови у часописима националног значаја):

15. Pajković, R.V., Krstić, M.M., Crnjanski, J.V., **Totović, A.R.**, Gvozdić, D.M., *Phase space of tristability in dual injection-locked Fabry-Perot laser diodes*, TELFOR Journal, vol. 7, no. 1, pp. 43-48, 2015. (ISSN 2334-9905, doi: 10.1109/TELFOR.2014.7034485)

Категорија M63 (Саопштење са националног скупа штампано у целини):

16. **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), pp. 840–843, Beograd, Srbija, 2011. (ISBN 978-1-4577-1499-3, doi: 10.1109/TELFOR.2011.6143675)

Доприноси објављени у радовима [3]-[6], [9]-[12], [14] и [16] представљају део основних резултата истраживања који ће бити изложени у докторској дисертацији кандидата. Ти доприноси ће бити употпуњени резултатима који до сада нису објављени.

Ангелина Тотовић учествовала је у реализацији једног пројекта које финансира надлежно министарство, почев од уписа докторских академских студија 2013. године:

1. „Фотонске компоненте и системи“, евб. 171011, пројекат Министарства просвете и науке Републике Србије (2011-2017).

Током периода од уписа докторских академских студија 2013. године, Ангелина је рецензирала радове за бројне међународне часописе, и то:

- IEEE Journal of Selected Topics on Quantum Electronics
- IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology
- OSA Optics Letters
- OSA Optics Express
- Optical Switching and Networking

У оквиру промоције науке, Ангелина је 21.04.2016. године одржала предавање под насловом „Телекомуникације кроз историју“ у Коларчевој задужбини у склопу циклуса „Физика која лечи, повезује и синхронизује – медицина, телекомуникације и теорија хаоса под лупом физике“.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Ангелина Тотовић се у свом досадашњем раду показала као успешна како у наставном, тако и у научно-истраживачком ангажовању. Испунила је све обавезе и положила све испите предвиђене планом и програмом докторских студија на Електротехничком факултету у Београду, чиме је сакупила сто двадесет (120) ЕСПБ и пред Комисијом, на јавној усменој одбрани, успешно положила докторски испит одржан 09.05.2017. године.

На основу досадашњег рада, публикованих научних резултата и успешно завршених обавеза према плану и програму докторских студија, Комисија је дошла до закључка да је кандидат, Ангелина Тотовић, квалификована за израду докторске дисертације на предложеној тему.

2. Предмет и циљ истраживања

Са све већим упливом оптичких мрежа у слојеве мрежне архитектуре ближе кориснику [1]-[4], јавља се потреба за решењима која су једноставна за реализацију и економски исплатива, али истовремено робусна и енергетски ефикасна, чиме се смањује почетна инвестиција провајдера, као и трошкови везани за одржавање мреже. Додатно, обим саобраћаја се повећава, како у мрежама далеког и средњег домета [4], [5], тако и на изузетно кратким удаљеностима (нпр. фарме сервера, дата центри) [6] што узрокује, са једне стране развој хибридних решења у случајевима када је мобилност крајњих корисника императив [3], [7], а са друге стране, тежњу ка све-оптичком преносу, обради и чувању података, када су приоритет брзина рада и имуност на електро-магнетске сметње [1]-[2]. Коначно, пратећи развојни пут електронике, од кола заснованих на дискретним компонентама ка интегрисаним колама, фотоника пролази кроз исти процес [8], због чега се инсистира на дизајну мултифункционалних компоненти малих димензија, чија се реализација спроводи устаљеним производним процесима у већ доступним постројењима.

Будући да су приступне оптичке мреже још увек у повоју, простор за осмишљавање нових, као и унапређење већ постојећих решења, врло је широк. Коришћење једне компоненте за више различитих функција увек је било примамљиво, а један од таквих примера су управо полупроводнички оптички појачавачи (енгл. *Semiconductor Optical Amplifiers*, SOAs) [7]-[17]. Иако се за своју основну функцију појачања користе већ деценијама, још увек представљају атрактивне уређаје јер могу понудити широк спектар других функција од интереса за приступне оптичке мреже [9]-[13], попут електро-оптичког (Е/О) или опто-оптичког гејта [9], Е/О ре/модулатора, конвертора таласних дужина [9]-[10], [14]-[15], све-оптичких логичких кола итд. Чињеница да се дуго истражују говори у прилог добро дефинисаној технологији њихове производње и прилагођавања конкретној намени [16]. SOA има низ атрактивних особина, полазећи од малих димензија и ниске струје напајања [3], [13], [16], преко могућности да му се особине подешавају дизајном активне области и геометрије уређаја [9], [13], до широког спектра појачања, што их чини одличним кандидатима за примену у оптичким мрежним јединицама на корисничкој страни у мрежама са мултиплексирањем по таласним дужинама [17].

Предмет истраживања предложене дисертације је развој напредних, детаљних и ефикасних нумеричких и аналитичких модела полупроводничких оптичких појачавача, у циљу примене SOA у приступним оптичким мрежама. Модели ће бити формирани полазећи од једначина континуитета написаних по концентрацијама носилаца наелектрисања, и просторно-временских једначина путујућих таласа написаних по спектралним густинама фотона за сигнал и шум појачане спонтане емисије, допуњених једначинама за опис еволуције фазе сигнала током пропагације. Служећи се формираним моделима намењеним за анализу перформанси SOA, како у стационарном и квази-стационарном, тако и у динамичком режиму рада, биће могуће извршити оптимизацију уређаја, тако да постигне максимални учинак за жељену функцију, било да је у питању укупно појачање уређаја, ширина спектра на ком се може постићи униформно појачање или 3dB пропусни опсег приликом модулације малим сигнаlima. Сложеност модела ће зависити од очекиваног режима рада, захтеваног степена тачности решења и доступних временских, меморијских и процесорских ресурса у случају нумеричких или полу-аналитичких модела. У оквиру унапређења перформанси SOA, најпре је потребно испитати опсеге вредности параметара који квантификују квалитет уређаја (појачање сигнала, однос сигнал-шум, 3dB пропусни опсег итд.) у зависности од материјалних и геометријских особина, као и радних услова. На основу утврђених зависности, биће спроведена мулти-димензионална оптимизација, која укључује избор сетова оптималних вредности материјалних, геометријских и радних параметара за захтевану примену SOA. Величине које се варирају током оптимизације морају бити одабране тако да их је лако контролисати приликом производње и тако да трпе извесну толеранцију дефинисану производним процесом.

Већина резултата у доступној литератури односи се на полупроводничке оптичке појачаваче на бази путујућег таласа (енгл. *Traveling-Wave SOA*, TW-SOA), будући да је мање захтеван за анализу јер оптички сигнал само једанпут пролази кроз активну област уређаја. Насупрот њима, рефлексиони полупроводнички оптички појачавачи (енгл. *Reflective SOA*, RSOA) дошли су у фокус истраживања тек недавно јер сложеност интеракције два контрапропагирајућа оптичка таласа намеће потребу за комплекснијим моделима који захтевају веће процесорске ресурсе или сложеније аналитичке моделе.

Циљ истраживања је развој нумеричких и аналитичких модела и метода, чијом применом је могуће остварити испитивање ефикасности и оптимизацију TW- и RSOA за примену у функцијама које су од интереса за приступне оптичке мреже. Конкретно, формиран нумерички и аналитички модели треба да обезбеде платформу за симулирање SOA као модулятора и ремодулатора оптичког сигнала који би се користио на корисничкој страни приступне мреже, конвертора таласних дужина, саставног дела оптичког предајника и сл. Посебан акценат ће бити стављен на примене у којима се захтева неосетљивост на таласну дужину сигнала, попут ремодулације, чиме се приступна мрежа значајно поједностављује. Анализа ће бити спроведена служећи се детаљним нумеричким моделима, којима ће бити могуће обухватити ефекте често занемарене у литератури, попут зависности фактора конфинирања од таласне дужине сигнала и концентрације носилаца, модулације фазе кроз инјекцију носилаца или пропационих ефеката струјног сигнала. Резултати нумеричких симулација ће послужити као репер у односу на који ће бити могуће проценити колико се полазни модел може поједноставити тако да резултати не одступају значајно, а да је на основу поједностављеног полазног модела могуће развити полу-аналитички или аналитички модел високе ефикасности.

Значај истраживања огледа се у могућности да се развојем напредних, детаљних и ефикасних модела постигне разумевање утицаја појединачних материјалних, геометријских и операционих параметара, као и њихових комбинација, на TW- и RSOA. На овај начин биће могуће дати смернице за унапређење карактеристика SOA и превазилажење тренутних ограничења. Нумерички модели ће омогућити детаљну и систематичну анализу RSOA и идентификовање његових предности и мана у поређењу са TW-SOA. Аналитички и полу-аналитички модели ће бити формиран тако да уз минимални степен апроксимација обезбеде високу тачност, што ће бити проверено поређењем резултата са свеобухватним нумеричким моделима. Овако формиран модели представљају атрактиван избор за софтверска решења намењена моделовању сложених оптичких система, где брзина рада и ниско заузеће ресурса представљају императив. Коначно, служећи се развијеним моделима, биће могуће испитати постојећа, али и предложити нова решења за примену SOA у приступним мрежама.

Преглед релевантне литературе

1. Ramaswami, R.: *Optical fiber communication: from transmission to networking*, IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 5, pp. 138-147, 2002. (ISSN 0163-6804, doi: 10.1109/MCOM.2002.1006983)
2. Sygletos, S. et al.: *Technological challenges on the road toward transparent networking*, J. Opt. Netw., vol. 7, no. 4, pp. 321-350, 2008. (eISSN 1536-5379, doi: 10.1364/JON.7.000321)
3. Carapellese, N., et al.: *Energy-efficient baseband unit placement in a fixed/mobile converged WDM aggregation network*, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 32, no. 8, pp. 1542-1551, 2014. (ISSN 0733-8716, doi: 10.1109/JSAC.2014.2335071)
4. Green, P.: *Progress in optical networking*, IEEE Commun. Mag., vol. 39, no. 1, pp. 54-61, 2001. (ISSN 0163-6804, doi: 10.1109/35.894377)
5. Coffman, K.G., Odlyzko, A.M.: *Internet growth: Is there a "Moore's Law" for data traffic?*, Handbook of massive data sets, pp. 47-93, Springer US, 2002. (ISSN 1569-2698, doi: 10.1007/978-1-4615-0005-6_3)
6. Kachris, C., Tomkos, I.: *A survey on optical interconnects for data centers*, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 14, no. 4, pp. 1021-1036, 2012. (ISSN 1553-877X, doi: 10.1109/SURV.2011.122111.00069)

7. Yu, X., et al.: *Bidirectional radio-over-fiber system with phase-modulation downlink and RF oscillator-free uplink using a reflective SOA*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 24, pp. 2180-2182, 2008. (ISSN 1041-1135, doi: 10.1109/LPT.2008.2009947)
8. Kehayas, E., et al.: *All-optical network subsystems using integrated SOA-based optical gates and flip-flops for label-swapped networks*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 16, pp. 1750-1752, 2006. (ISSN 1041-1135, doi: 10.1109/LPT.2006.880784)
9. Connelly, M.J.: *Semiconductor Optical Amplifiers*, Norwell, MA: Kluwer, 2002. (eISBN 978-0-306-48156-7, doi: 10.1007/b101817)
10. Mecozzi, A., Wiesenfeld, J.M.: *The roles of semiconductor optical amplifiers in optical networks*, Opt. Photonics News, vol. 12, no. 3, pp. 36-42, 2001. (ISSN 1047-6938, doi: 10.1364/OPN.12.3.000036)
11. Zimmerman, D.R., Spiekman, L.H.: *Amplifiers for the masses: EDFA, EDWA, and SOA amplifiers for metro and access applications*, J. Lightw. Technol., vol. 22, no. 1, pp. 63-70, 2004. (ISSN 0733-8724, doi: 10.1109/JLT.2003.822144)
12. Olsson, N.A.: *Lightwave systems with optical amplifiers*, J. Lightw. Technol., vol. 7, no. 7, pp. 1071-1082, 1989. (ISSN 0733-8724, doi: 10.1109/50.29634)
13. Mørk J., et al.: *The dynamics of semiconductor optical amplifiers: modeling and applications*, Opt. Photonics News, vol. 14, no. 7, pp. 42-48, 2003. (ISSN 1047-6938, doi: 10.1364/OPN.14.7.000042)
14. Durhuus, T., et al.: *All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers*, J. Lightw. Technol., vol. 14, no. 6, pp. 942-954, 1996. (ISSN 0733-8724, doi: 10.1109/50.511594)
15. Liu, Y., et al.: *Wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, no. 1, pp. 90-92, 2003. (ISSN 1041-1135, doi: 10.1109/LPT.2002.805862)
16. Wei, X., et al.: *10-Gb/s RZ-DPSK transmitter using a saturated SOA as a power booster and limiting amplifier*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 6, pp. 1582-1584, 2004. (ISSN 1041-1135, doi: 10.1109/LPT.2004.826732)
17. Kani, J.I.: *Enabling technologies for future scalable and flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON systems*, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 16, no. 5, pp. 1290-1297, 2010. (ISSN 1077-260X, doi: 10.1109/JSTQE.2009.2035640)

3. Полазне хипотезе

Хипотезе на основу којих ће бити спроведено истраживање гласе:

- Полупроводнички оптички појачавачи, самостално или у комбинацији са другим фотонским компонентама, могу бити примењени у функцијама које превазилазе њихову основну намену појачавача.
- На основу физичког модела заснованог на брзинским једначинама, могуће је развити нумеричке моделе који описују детаљне карактеристике SOA, служећи се методом коначних разлика и итеративним методама.
- Уопштавањем итеративног поступка тако да се приликом прорачуна користе резултати из више претходних итеративних корака, пондерисани одговарајућим сетом коефицијената, могуће је обезбедити стабилну конвергенцију алгорита ка решењу.
- Уопштавањем итеративног поступка тако да се истовремено ажурирају све променљиве од интереса, могуће је побољшати стабилност алгорита.
- На основу физичког модела заснованог на брзинским једначинама, могуће је развити апроксимативне аналитичке и полу-аналитичке моделе чији су резултати у високој сагласности са резултатима добијеним детаљним нумеричким моделима.
- Служећи се нумеричким и/или аналитичким моделима, могуће је одредити материјалне, геометријске и операционе услове који утичу на параметре квалитета SOA.
- Могуће је одредити опсеге параметара квалитета SOA у зависности од дозвољених опсега материјалних, геометријских и операционих параметара.
- Могуће је одабрати оптимални сет или сетове параметара тако да перформансе SOA (појачање и/или 3dB пропусни опсег) буду унапређене за конкретну примену.
- Постоји разлика између перформанси TW- и RSOA која захтева да се у конкретној примени пажљиво направи адекватан избор уређаја.

4. Научне методе истраживања

Полупроводнички оптички појачавачи биће моделовани полазећи од система просторно-временских спрегнутих интегро-диференцијалних једначина написаних по концентрацијама носилаца, спектралним густинама и фазама сигнала и шума, за оба смера пропагације. Модел активне области укључиће детаљну зависност свих релевантних параметара (материјалног појачања, брзине спонтане емисије, варијације индекса преламања итд.) од концентрације носилаца и фреквенције сигнала, чиме ће бити обухваћени ефекти који нису укључени у стандардне моделе доступне у литератури. Електрична струја биће представљена као путујући микроталас дуж микротракасте електроде, што је посебно важно при модулацији високим битским брзинама, када се пропагациони ефекти струје не могу занемарити. Имајући у виду комплексност полазног система једначина, истраживање ће бити спроведено на моделима који су прилагођени режиму рада. Најпре ће бити анализиран стационарни случај, где ће бити могуће идентификовати који параметри, и под којим операционим условима, доминантно одређују појачање и однос сигнал-шум. Затим ће бити спроведена анализа у динамичком режиму за велике сигнале. Коначно, биће испитан режим малих сигнала и утврђени параметри који доминантно дефинишу динамичке карактеристике SOA. У сва три случаја, најпре ће бити формиран детаљан нумерички модел, а затим, у оном степену у ком је могуће извршити апроксимације, формиран аналитички или полу-аналитички модел.

Детаљан стационарни модел биће развијен имплементацијом самосагласног итеративног поступка. Током поступка, све променљиве од интереса биће ажуриране на основу резултата из неколико претходних итеративних корака, који ће бити пондерисани одабраним сетом коефицијената, који у збиру дају 1. Сматраће се да је алгоритам обезбедио тачно решење искључиво када све променљиве од интереса у свакој просторној тачки и за сваку анализирану фреквенцију испуне наметнуту толеранцију релативне грешке, која неће бити већа од 0.1%. У оквиру једног итеративног корака, једначине ће бити решавање нумеричком интеграцијом.

Поједностављени стационарни модел биће развијен полазећи од претпоставке да се просторна зависност концентрације носилаца наелектрисања може апроксимирати константном, део-по-део константном или линеарном функцијом.

Динамички модел за велике сигнале биће имплементиран помоћу *upwind* шеме засноване на методи коначних разлика, уз испуњен *Courant-Friedrichs-Lewy* критеријум стабилности, који гарантује конвергенцију алгоритма.

Детаљан динамички модел за мале сигнале биће развијен имплементацијом самосагласног итеративног поступка за прорачун дистрибуције сигнала и носилаца наелектрисања за сваку од анализираних фреквенција струје модулације. У случају TW-SOA, једначине у оквиру једног корака биће решавање нумеричком интеграцијом, док ће у случају RSOA систем једначина са граничним условима бити решаван помоћу Лобато IIIA метода колокације. Након установљене зависности снага излазних оптичких малих сигнала од фреквенције модулације струје, биће извршена сплајн интерполација за одређивање граничне фреквенције.

При развоју аналитичког модела SOA за мале сигнале, биће претпостављен режим транспаренције, уз додатно поједностављење физичког модела, како би било могуће извести апроксимативни аналитички израз за процену пропусног опсега.

Служећи се развијеним моделима, биће спроведена анализа параметара који описују квалитет SOA спрема густине електричне струје поларизације, оптичке снаге упадног сигнала, димензија активне области, врсте активне области, рефлексивности бочних страница SOA и сл. На тај начин биће установљени опсежи вредности појачања уређаја, односа сигнал-шум на излазу, као и 3dB пропусног опсега, а затим извршена оптимизација SOA.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће резултати који буду проистекли из ове тезе представљати следеће научне доприносе:

- Формирање детаљних стационарних и динамичких модела за анализу RSOA који недостају у литератури, а на основу којих је могуће образложити постојеће експерименталне резултате, као и предложити нове фотонске уређаје засноване на RSOA.
- Идентификација утицаја зависности материјалних параметара активне области од енергије и концентрације носилаца на стационарне и динамичке карактеристике TW- и RSOA.
- Идентификовање параметара који се једноставно могу мењати, било у току рада (операциони параметри) или у току производног процеса (нпр. дужина активне области, геометрија у трансверзалној равни), а који значајно утичу на перформансе SOA.
- Разумевање утицаја пропагационих ефеката електричне струје на модулациони одзив SOA и идентификовање граничне фреквенције модулације до које је могуће користити модел концентрисаних параметара и тренутне униформне дистрибуције струје у активnoj области.
- Формирање апроксимативних алгоритама за симулацију SOA у стационарном и динамичком режиму који захтевају скромне временске, меморијске и процесорске ресурсе.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања биће подељен у неколико фаза:

- Биће извршен преглед литературе и идентификоване могућности за примену SOA у приступним оптичким мрежама, било као самосталне јединице или у сложеним фотонским колима.
- Биће извршено поређење доступних модела и идентификовани кључни ефекти за које је потврђено да значајно утичу на перформансе SOA, било на основу експеримената или већ доступних теоријских модела.
- Биће развијен и имплементиран нумерички модел помоћу кога ће бити симулирани материјални параметри активне области SOA, којима је могуће обухватити идентификоване кључне ефекте.
- Биће формиран свеобухватни физички модел уређаја у који ће бити укључени претходно прорачунати материјални и геометријски параметри.
- Модел ће бити прилагођен стационарном режиму рада, биће формирана платформа за нумеричко решавање система једначина заснована на итеративном поступку, а затим анализирани добијени резултати. Модел ће затим бити додатно поједностављен апроксимирањем концентрације носилаца аналитичком функцијом тако да је један део процедуре решавања резултујућих једначина могуће спровести аналитички. Биће извршено поређење резултата добијених применом нумеричког и аналитичког модела.
- Модел ће бити прилагођен динамичком режиму рада са великим сигнаlima, биће формирана платформа за нумеричко решавање система једначина заснована на методи коначних разлика, а затим спроведена анализа добијених резултата.
- Модел ће бити прилагођен динамичком режиму рада са малим сигнаlima, биће формирана платформа за нумеричко решавање система једначина служећи се итеративним поступком, а затим спроведена анализа добијених резултата. Биће извршено поређење резултата добијених анализом струје као микроталаса (са и без рефлексије на крају микротракасте електроде) и анализом униформне дистрибуције струје. Модел ће бити поједностављен тако да је једначине могуће аналитички решити, након чега ће бити извршено поређење резултата добијених нумеричким и аналитичким приступом.
- Биће дефинисане смернице за оптимизацију TW- и RSOA у зависности од режима рада.

7. Закључак и предлог

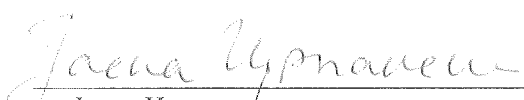
Кандидат Ангелина Тотовић пријавила је докторску дисертацију под насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама“ у складу са Правилником о докторским студијама на Електротехничком факултету Универзитета у Београду и поднела сва предвиђена документа. На основу приложене документације, као и непосредног увида у научноистраживачки рад кандидата, закључујемо да кандидат дипл. инж. ел. – маг. Ангелина Тотовић испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. У образложењу теме, као и предлогу тезе, наведени су јасно и прегледно научни проблеми које теза треба да разреши, као и очекивани научни доприноси. На основу образложења предмета и циља истраживања, објашњења полазних хипотеза и методологије истраживања, као и очекиваних научних резултата, закључујемо да је предложена тема научно актуелна у области **фотоники и наноелектронике**, за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан.

На основу свега наведеног предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Ангелини Тотовић одобри израду докторске дисертације под насловом „Моделовање полупроводничких оптичких појачавача за примене у оптичким приступним мрежама“ и за ментора предлажемо др Дејана Гвоздића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

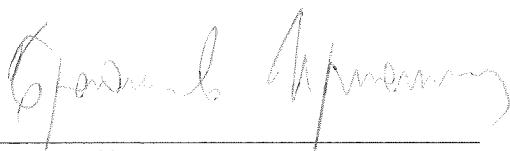
У Београду, 22.05.2017. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Јасна Црњански, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Јован Радуновић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Братислав Ирићанин, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет