

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милане Лаловић за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа на својој 879. седници бр. 1639 од 18.11.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милане Лаловић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Утицај зрачења на оптичке линкове реализоване у силицијумској фотоници“ (енг. „*Radiation Effects in Silicon Photonics Optical Links*“)

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милана Лаловић је рођена 31.08.1994. године у Сарајеву, БиХ-РС. Завршила је основну школу "Свети Сава" у Зворнику, са одличним успехом. Уписала је Гимназију и ССШ „Петар Кочић“ у Зворнику, коју је завршила као носилац Вукове дипломе. Електротехнички факултет Универзитета у Београду је уписала 2013. године. Дипломирала је на одсеку за Физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, 2017. године са просечном оценом 8,85. Дипломски рад на тему „Реализација све-оптичке NOR логике примјеном инјекционе синхронизације у ласерским диодама“ одбранила је код доц. др Марка Крстића 04. јула 2017. године са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за Наноелектронику и фотонику, уписала је у октобру 2017. године. Положила је све испите са просечном оценом 10. Мастер рад на тему „Све-оптички комутатори на основу унакрсне модулације фазе и оптичког појачања у полупроводничким оптичким појачавачима“ је одбранила код др Јасне Црњански 14. септембра 2018. године са оценом 10. Докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за Наноелектронику и фотонику, уписала је у октобру 2018. године. На докторским студијама положила је све испите и испунила све обавезе предвиђене планом докторских студија сакупивши предвиђених 120ЕСПБ.

Од 15. јуна 2019. запослена је у Институту за нуклеарне науке „Винча“, Универзитета у Београду, као истраживач приправник у Лабораторији за физику. Од 01. марта 2020. се налази на стручном усавршавању и запослена је као докторски студент у Европској организацији за нуклеарна истраживања - ЦЕРН, Швајцарска, где обавља научно-истраживачки рад у области силицијумске фотонице.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Од 15.06.2019. до 29.02.2020. је била запослена као истраживач-приправник у Лабораторији за физику, Института за нуклеарне науке „Винча“. Од 01.03.2020. се налази на стручном усавршавању у Европској Лабораторији за нуклеарна истраживања – ЦЕРН, Женева, Швајцарска.

На докторским студијама на Електротехничком факултету положила је испите:

1. 13Д061ФО – Фуријеова оптика, оцена 10, ЕСПБ = 9
2. 13Д061ПИК – Пројектовање интегрисаних кола, оцена 10, ЕСПБ = 9
3. 13Д061МПЛ – Моделовање полупроводничких ласера, оцена 10, ЕСПБ = 9
4. 13Д061НО – Нелинеарна оптика, оцена 10, ЕСПБ = 9
5. 13Д061ОММ – Оптиелектронске мерне методе, оцена 10, ЕСПБ = 9
6. 13Д061ФК – Фотонске комуникације, оцена 10, ЕСПБ = 9
7. 13Д061КО – Квантна оптика, оцена 10, ЕСПБ = 9
8. 13Д091УНР – Увод у научни рад, оцена 10, ЕСПБ = 6
9. 13Д061МФКС – Модерне фотонске компоненте и системи, оцена 10, ЕСПБ = 9
10. 13Д061ТПНФ – Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници, оцена 6, ЕСПБ = 9

Просечна оцена: 9.60

Збир ЕСПБ поена: 87

Обавезе:

1. Студијски истраживачки рад 1 - ЕСПБ = 15, 30.09.2019.
2. Научно стручни рад - ЕСПБ = 3, 29.09.2020.
3. Студијски истраживачки рад 2 - ЕСПБ = 15, 30.09.2020.

30.09.2020. је положила све испите и обавезе предвиђене програмом докторских студија и остварила предвиђених 120 ЕСПБ. Усмена одбрана теме Милене Лаловић је одржана 6.12.2022. у просторијама Електротехничког факултета пред Комисијом у саставу др Слободан Петричевић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, др Небојша Ромчевић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику у Београду и др Марија Стевановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет и завршена је са оценом задовољно.

Категорија М20 (Радови објављени у часописима међународног значаја)

- [1] **Lalović M.**, Scarcella C., Bulling A., Detraz C., Marcon L., Olantera L., Prousalidi T., Sandven U., Sigaud C., Soos C., Troska J., Ionizing Radiation Effects in Silicon Photonics Modulators, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 69, no. 7, pp. 1521-1526, July 2022, (IF: 1.708, ISSN: 0018-9499), doi: 10.1109/TNS.2022.3148579. (M23)
- [2] Prousalidi, T., Bulling, A., Court, M., Detraz, S., **Lalović, M.**, Marcon, L., Olanterä, L., Orfanelli, S., Sandven, U., Scarcella, C., Sigaud, C., Soós, C., Troska, J., Towards optical data transmission for high energy physics using silicon photonics, *Journal of Instrumentation*, vol. 17, no. 05, p. C05004, May 2022, (IF: 1.188, ISSN: 1748-0221), doi: 10.1088/1748-0221/17/05/c05004. (M23)

Категорија М30 (Зборници међународних научних скупова)

- [3] **Lalović, M.**, Mićević, A., Krstić, M.M., Crnjanski, J. V., Totović, A.R., Gvozdić, D. M., Reconfigurable all-optical NAND/NOR logic gate based on dual injection-locked laser diodes, *VI International School and Conference on Photonics*, pp. 146, August 2017, Belgrade, Serbia (ISBN: 978-86-82441-46-5) (M34)

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства види се да је Милана Лаловић школована у области оптике, интегрисаних кола, оптоелектронских мерних метода и фотонских компоненти и система. Имајући у виду и раније школовање као и експериментални рад којим се бавила сматрамо да је Милана Лаловић способан кандидат за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања је испитивање утицаја зрачења на оптичке линкове реализоване у силицијумској фотоници за потребе будућих експеримената физике високих енергија. Циљ истраживања је унапређење оптичких линкова који тренутно преносе податке са ЦЕРН-ових детектора до система за одлучивање. Тренутни оптички линкови неће моћи да издрже нивое зрачења нити да обезбеде пренос података који се очекују унапређењем Великог Хадронског Сударача (енг. *Large Hadron Collider*). Приликом фазе Високог флуksа (енг. *High Luminosity* фазе), очекује се да нивои флуksа порасту пет до седам пута у односу на тренутне. Главна примена побољшаних оптичких линкова ће бити у високо-енергетској физици (енг. *High Energy Physics*) где је потребно у кратком времену пренети огромне количине података и истовремено обезбедити поузданост рада у окружењу високоенергетских честица. С обзиром на постојање високих нивоа зрачења у свемирском окружењу ово истраживање је значајно и за конструкцију оптичких линкова у свемирским летелицама.

3. Полазне хипотезе

На основу претходних истраживања познато је да зрачење утиче на све делове оптичких линкова укључујући детекторе, модулаторе и таласоводе. [1] Самим тим све компоненте морају да буду отпорне на зрачење. Силицијумска фотоника (енг. *SiPh – Silicon Photonics*) је грана оптике која обећава напредак у погледу количине података коју може да обради и пренесе. [2] Од самог дизајна силицијумских фотонских уређаја зависи и њихова отпорност на зрачење. [3] Након прегледа релевантне литературе [4, 5, 6] дошло се до закључка да постоји простор за унапређење силицијумских фотонских модулатора, тачније Мах-Зендерових модулатора (енг. *MZM – Mach-Zehnder Modulator*) и прстенастих модулатора (енг. *RM – Ring Modulator*). Модулатори са различитим геометријским параметрима и концентрацијом допираности полупроводника могу да имају различите ефикасности модулације, али и различиту поузданост у окружењу снажног зрачења. Укупне дозе зрачења које се очекују у ЦЕРН-овим детекторима у току десетогодишњег рада и које ће уједно бити и циљна доза тестова зрачења су 10 MGy и $1.6 \cdot 10^{16}$ n/cm². Претпоставка је да ће јонизујуће зрачење оставити веће последице на SiPh структуре. [6] Поред тога, температура може да утиче на рад модулатора [7], те је потребно испитати у ком температурном опсегу се постиже најефикаснији рад SiPh модулатора.

Литература:

- [1] F. Vasey *et al.*, “Development of radiation-hard optical links for the CMS tracker at CERN,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 45, no. 3, pp. 331–337, Jun. 1998, doi: [10.1109/23.682403](https://doi.org/10.1109/23.682403).
- [2] J. Witzens, “High-Speed Silicon Photonics Modulators,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 12, pp. 2158–2182, Dec. 2018, doi: [10.1109/JPROC.2018.2877636](https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2877636).

- [3] M. Zeiler *et al.*, "Radiation hardness evaluation and phase shift enhancement through ionizing radiation in silicon Mach-Zehnder modulators," in *2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Sep. 2016, pp. 1–4. doi: [10.1109/RADECS.2016.8093130](https://doi.org/10.1109/RADECS.2016.8093130).
- [4] S. Seif El Nasr-Storey *et al.*, "Effect of Radiation on a Mach-Zehnder Interferometer Silicon Modulator for HL-LHC Data Transmission Applications," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 62, no. 1, pp. 329–335, Feb. 2015, doi: [10.1109/TNS.2015.2388546](https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2388546).
- [5] M. Zeiler *et al.*, "Design of Si-photonic structures to evaluate their radiation hardness dependence on design parameters," *J. Inst.*, vol. 11, no. 01, pp. C01040–C01040, Jan. 2016, doi: [10.1088/1748-0221/11/01/C01040](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/C01040).
- [6] M. Zeiler *et al.*, "Radiation Damage in Silicon Photonic Mach-Zehnder Modulators and Photodiodes," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 11, pp. 2794–2801, Nov. 2017, doi: [10.1109/TNS.2017.2754948](https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2754948).
- [7] A. Kraxner *et al.*, "Investigation of the Influence of Temperature and Annealing on the Radiation Hardness of Silicon Mach-Zehnder Modulators," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, no. 8, pp. 1624–1631, Aug. 2018, doi: [10.1109/TNS.2018.2823863](https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2823863).

4. Научне методе истраживања

- Експериментална *in situ* мерења карактеристика силицијумских фотонских компоненти (дубина модулације Мах-Зендерових и прстенастих модулятора и осетљивости фотодиода) које се налазе на фотонском интегрисаном чипу (енг. *PIC – Photonic Integrated Circuit*).
- Упоредна анализа података прикупљених у току *in situ* мерења за интегрисане силицијумске фотонске модулаторе различитих геометријских параметара и концентрација допирања као и за фотодиоде различитих геометрија.
- Експериментална мерења карактеристика SiPh компоненти приликом озрачивања са различитим изворима зрачења (X - зрачење, γ – зрачење, неутронски сноп) ради утврђивања отпорности SiPh компоненти на поменуте облике зрачења.
- Анализа података о карактеристикама компоненти прикупљених током тестова зрачења и упоређивање са подацима прикупљеним без утицаја зрачења.
- Рачунарске симулације интегрисаних силицијумских фотонских модулятора у софтверском програму *Lumerical* за поређење резултата добијених експериментом и резултата симулација.
- Рачунарске симулације расподеле температуре у прстенастим модулаторима и микро-грејачима у софтверском програму *Lumerical* за боље разумевање утицаја температуре на ове модулаторе.

5. Очекивани научни допринос

- Биће остварен допринос развоју оптичких линкова који ће да остварују бржи проток података и који ће бити отпорнији на зрачење у односу на постојеће оптичке линкове, а који ће бити уграђени у ЦЕРН-ове детекторе 2035. године.
- По први пут ће бити испитани утицаји јонизујућег и нејонизујућег зрачења на интегрисане силицијумске прстенасте модулаторе.
- Биће спроведена детаљна анализа геометријских параметара свих SiPh модулятора и дат предлог оптималног дизајна за следећи унапређени SiPh чип наредне генерације.
- Биће урађена детаљна анализа утицаја температуре на SiPh модулаторе и дат предлог оптималног коришћења SiPh модулятора у оптичким линковима.
- Биће реализована карактеризација утицаја зрачења на интегрисане таласоводе и фотодиоде тренутне генерације.

6. План истраживања и структура рада

Силицијумски фотонски чип, произведен у *imes*-у, Белгији, а дизајниран у ЦЕРН-у, ће бити коришћен као тест чип на коме постоје све структуре које су потребне за рад једног оптичког линка – таласоводи, модулатори и фотодиоде. Извор светлости се не налази на чипу и неће бити у окружењу високог зрачења. Самим тим, извори светлости неће бити предмет истраживања. Као извор ће бити коришћена ласерска диода таласне дужине 1550 nm.

За почетак истраживања неопходно је да се испитају основне структуре на чипу, пре него што се направи целокупна експериментална поставка. Компанија *imes* је испоручила око 50 истих чипова који ће бити коришћени за све наредне тестове. Сваки чип и свака структура на њему се пажљиво тестира на кратак спој помоћу електричних микро-сонди и мери се напон пробоја структура заснованих на *pn*-споју. Након што се утврди да чип није оштећен у производњи или транспорту, потребно је урадити спрезање оптичких влакана са чипом, помоћу стаклене призме и интегрисаних дифракционих решетки на чипу. Такође, за приступ електричним контактима структура, чип ће се налазити на штампаној плочи (енг. *PCB – Printed Circuit Board*) која омогућава симултани приступ свим структурама. Након ових првих припрема се приступа прављењу експерименталне поставке која ће бити основа свих наредних експерименталних истраживања.

На тест чипу постоје три Мах-Зендерова модулатора, 20 прстенастих модулатора и пет различитих фотодиода. Сви модулатори су засновани на *pn*-споју. Сваки од прстенастих модулатора је опремљен са микро-грејачем који даје додатни степен слободе за карактеризацију поменутих модулатора у односу на Мах-Зендерове модулаторе. Микро-грејачи представљају микро-отпорнике, на чије крајеве се доводи напон. Загревањем микро-грејача, долази до промене температуре у *pn*-споју прстенастог модулатора, а самим тим и до промене резонантне таласне дужине. Пожељно је да се уради карактеризација ових грејача како би се одредила температурно-напонска карактеристика грејача, као и зависност резонантне таласне дужине модулатора од температуре.

Након што су познате све зависности, може се приступити осмишљавању процедура мерења. За симултану контролу свих модулатора потребан је велики број инструмената и њихово управљање помоћу рачунара. За контролу инструмената помоћу рачунара користиће се „NI VISA GPIB to USB“ контролер, а процедуре ће бити написане у програмском окружењу IgorPro. За сваки од инструмената потребно је да се напише посебна процедура, које ће на крају бити имплементирани у један главни код. Неке од функционалности које ће бити имплементирани у коду су: мерење оптичког спектра модулатора, мерење резонантних учестаности модулатора, одређивање модулационе ефикасности модулатора, мерење фотострује фотодиода, мерење струје мрака фотодиода, мерење губитака у таласоводима.

Први експеримент који треба да буде спроведен јесте онај у коме се потврђује рад експерименталне поставке и врши статичка карактеризација свих претходно поменутих параметара. Испитује се стабилност и прецизност мерења, тако што експеримент траје непрекидно, а у случају да је појави слаба тачка у поставци, ради се на отклањању проблема. Овако добијени подаци су веома важни као референтне вредности параметара структура које ће бити коришћене за поређење са вредностима истих параметара током зрачења.

Након овакве карактеризације у плану је да се чипови озраче више пута са више различитих извора. Како би се раздвојили утицаји јонизујућег и нејонизујућег зрачења, планирани су тестови са X – зрацима и γ – зрацима за јонизујуће зрачење и тестови са неутронским снопом за нејонизујуће зрачење. Очекује се да ће јонизујуће зрачење оставити веће последице на SiPh структуре, те је плану већи број оваквих тестова при различитим условима, како би се пронашао оптимални начин рада. Укупне дозе зрачења које се очекују у ЦЕРН-овим детекторима у току десетогодишњег рада и које ће уједно бити и циљна доза тестова су 10 MGy и $1.6 \cdot 10^{16}$ n/cm². Тестови X – зрацима и γ – зрацима ће бити спроведени у ЦЕРН-у. Тестови са неутронским извором ће се одвијати у Белгији, с обзиром да такав извор

није доступан у оквирима ЦЕРН-а. У току тестова све мерене вредности ће бити упоређиване са истим без зрачења, те се као исход тестова очекује да ће бити одређена извесна граница до које уређаји показују задовољавајуће перформансе.

У паралели са експерименталним тестовима, у плану су рачунарске симулације уређаја у софтверском програму Lumerical. Ове симулације треба да потврде функционалност уређаја при идеалним условима без утицаја зрачења, а затим да се унапреде тако да узимају у обзир друге утицаје околине. Дисертација ће бити написана на енглеском језику.

7. Закључак и предлог

На основу свега изложеног сматрамо да је кандидат Милана Лаловић подобан кандидат за реализацију предвиђених циљева истраживања. Предложена тема под називом „Утицај зрачења на оптичке линкове реализоване у силицијумској фотоници“ (енг. *Radiation Effects in Silicon Photonics Optical Links*) је подобна, веома актуелна и имаће директну примену у реализацији нових оптичких линкова у ЦЕРН-у.

Комисија констатује да предложена тема припада ужој научној области Физичка електроника и да је Електротехнички факултет у Београду матичан за ову научну област те за ментора израде докторске дисертације предлаже др Пеђу Михаиловића, ванредног професора Електротехничког факултета у Београду. Уз извештај се прилаже и списак радова др Пеђе Михаиловића, ванредног професора, који га квалификује за ментора.

Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Милани Лаловић одобри израду докторске дисертације на тему: „Утицај зрачења на оптичке линкове реализоване у силицијумској фотоници“ (енг. *Radiation Effects in Silicon Photonics Optical Links*).

Дисертација ће бити написана на енглеском језику.

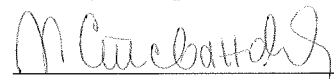
Београд, 12.12.2022.г.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Слободан Петричевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Небојша Ромчевић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику


др Марија Стевановић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет