

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милановић Бојана, магистра електротехничких наука, за израду докторске дисертације

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду нас је на својој 762. седници одржаној 14. 05. 2013. године именovalo за чланове Комисије за оцену подобности кандидата **Милановић Бојана**, магистра електротехничких наука, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме коју је кандидат пријавио под насловом: **“Одређивање карактеристика оптичких филтара са микропрстенастим резонатором применом методе коначних елемената”**.

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Бојан Милановић је рођен 31. 08. 1976. године у Прокупљу, Општина Прокупље, Република Србија. Основну школу и гимназију природно-математичког смера завршио је у Куршумлији са средњом оценом 5,00, чиме је стекао Вукову диплому. Војно техничку академију у Београду, смер Ваздухопловно-техничке службе, тада Одсек Ваздухопловне електронике и телекомуникација Електротехничког факултета у Београду, уписао је 1995. и завршио 2000. године са просечном оценом 8,46. Исте године уписао је магистарске студије на Електротехничком факултету у Београду, на смеру Примењена електромагнетика и оптоелектроника. Магистарске студије завршио је 2005. године. Од завршетка основних студија 2000. године стално је запослен у Војној академији у Београду, где је ангажован као асистент на предметима: Електротехника 1, Електротехника 2, Микроталасна техника, Електромагнетика, Микроталасна мерења, Радарске антене, Радарска техника и Ваздухопловни радио уређаји и системи.

1.2 Стечено научно- истраживачко искуство

Бојан Милановић је магистар електротехничких наука за област примењена електромагнетика и оптоелектроника. Магистарски рад под називом "Анализа утицаја електронских дејстава на моноимпулсну радарску главу за самонавођење", под

руководством ментора проф. др Мирослава Дукића, одбранио је 26. 10. 2005. године. У свом магистарском раду кадиндат је у програмском пакету МАТЛАБ моделовао *Cross eye* методу ометања моноимпулсне радарске главе за самонавођење. У току истраживања спроведених током израде магистарске тезе, а на основу резултата добијених анализом статичког и динамичког модела навођења ракете, Бојан је предложио побољшања у примени методе ометања.

Бојан Милановић је наставио да се бави применом нумеричких алата у анализи физичких појава и након одбране магистарског рада. Резултати тих истраживања су објављени у неколико радова, у којима је за симулацију транспортних појава коришћена метода коначних разлика у временском домену (*Finite Difference Time Domain*). Као резултат симулације добијена је временска промена температурног поља у металном узорку са подповршинским дефектима настала након осветљавања узорка кратким светлосним импулсом.

Поред методе коначних разлика, кандидат је упознат и са основама методе момената. Објавио је два рада у међународном часопису са СЦИ листе, у којима је користио методу коначних елемената у анализи микропрстенастог резонатора, што спада у проблематику предложене теме докторске дисертације.

Бојан Милановић је објавио следеће радове:

а) у часописима са СЦИ листе:

- 1) **Милановић Б.**, Рађеновић Б. и Радмиловић - Рађеновић М.: *Three-dimensional finite-element modeling of optical microring resonators*, *Physica Scripta*, Vol 2012, T149, 2012, 014026, (IF 1.204, за 2011. год.)
- 2) Рађеновић Б., **Милановић Б.** и Радмиловић – Рађеновић М.: *Electric field enhancement in silicon slotted optical strip waveguides and microring resonators*, *Physica Scripta*, Vol 2012, T149, 2012, 014027. (IF 1.204, за 2011. год.)

б) у зборницима са међународних конференција:

- 3) Томић Љ., Елазар Ј., Дамњановић В., **Милановић Б.**: *Defect detection in aluminum using pulse thermography for a sample with periodic structure*, *The 3rd International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices*, *Book of Abstracts*, Beograd 2012, pp. 269,
- 4) Томић Љ., Елазар Ј., Дамњановић В., **Милановић Б.**, Ковачевић А.: *Temperature Contrast Enhancement Techniques in Pulse Video Thermography Applications*, *5th International Scientific Conference on Defensive Technologies*, Beograd 2012, pp. 427-431,
- 5) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.**: *Numerical Simulation of the Temperature Field in Pulse Radiometric Defectoscopy*, *Proc. Abstr.*, 14th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT- 14, 052-TH, Military Technical College, Kobry Elkobbah, Cairo May 24. – 26. 2011, Cairo, pp. 99,

- 6) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *Maximal Temperature Difference Determination in Pulse Infrared Thermography by Fitting Experimental Results with Numerical Simulation Curve*, Book of Abstr., III International School and Conference on Photonics Conference, Photonica2011, Belgrade 2011, pp. 66,
- 7) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *Characterization of subsurface defects by radiometric non-destructive defectoscopy*, зборник радова, 4. НАУЧНО-СТРУЧНИ СКУП из области одбрамбених технологија, ОТЕХ 2011, Београд 2011, стр. 587-591,
- 8) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *The influence of subsurface defects in material on differencies in numerical and experimental detection results, applying pulse thermography*, Proc. Abstr. 3rd Conference MediNano, 18-19 October, Београд 2010, pp. 77.

в) у домаћем часопису:

- 9) Милановић Б.: *Ометање радарских глава за самонавођење амплитудно модулисаном методом ометања "Cross eye"*, Војнотехнички гласник, Vol 08, No 3, 2008, стр. 44-60

г) у зборницима са домаћих конференција:

- 10) Митровић С., Дикић Г., **Милановић Б.:** *Дистрибуирани фази контролер за двосмерно навођење мобилног робота максималном брзином кроз окружење са препрекама*, 55. конференција ЕТРАН 2011, Бања Врућица 2011,
- 11) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *Numerical simulation of temperature field in active infrared thermography*, 55. конференција ЕТРАН 2011, Бања Врућица 2011, MO1.4-1-4,
- 12) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *Нумеричка симулација температурног поља у импулсној радиометријској дефектоскопији*, Proc. 54th ETRAN Conference, 2010, MO1.5-1-4,
- 13) Томић Љ., Елазар Ј., **Милановић Б.:** *Утицај потповршинских дефеката у материјалу на разлике између нумеричких и експерименталних резултата детекције, применом импулсне термографије*, Зборник апстраката, Конференција Фотоника 2010, Београд 2010, стр 32.

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Бојан Милановић је магистрирао на смеру Примењена електромагнетика и оптоелектроника Електротехничког факултета у Београду. Више година држи наставу из предмета Електротехника, Електромагнетика и Микроталасна техника. Неколико објављених радова у којима су коришћене нумеричке методе показује да кандидат влада потребним алатом за спровођење истраживања. Знање и искуство стечено на магистарским студијама, током извођења наставе на Војној академији у Београду, а нарочито током истраживања која су резултирала објављеним радовима, квалификују Бојана Милановића за научно-истраживачки рад на теми везаној за простирање

електромагнетних таласа у оптичким таласоводима и анализу појава везаних за спрегу модова између равног и прстенастог таласовода.

2. Предмет и циљ истраживања

У својој основној конфигурацији микропрстенасти резонатор се састоји од оптичког таласовода у облику прстена, који је спрегнут са једним или два линеарна таласовода и обично се израђује у интегрисаној технологији. Микропрстенасти резонатори су саставни делови оптичких мултиплексера и демултиплексера, филтара за обраду сигнала, оптичких сензора, ласера, модулатора, прекидача, меморијских елемената и других оптичких елемената. Због својих малих димензија погодни су за израду густо пакованих оптичких интегрисаних кола.

У односу на друге компоненте исте намене и сличних димензија, микропрстенасти резонатори имају најужу спектралну карактеристику пропусног (непропусног) дела спектра. Спектрална карактеристика резонатора са једним микропрстеном је облика Лоренцове функције. Каскадном везом више оваквих резонатора може се генерисати преносна функција филтра вишег реда, жељених карактеристика.

Циљ интегрисане оптике је интеграција компонената у један једини оптички чип. Смањење димензија резонатора са једним прстеном води у том правцу. Поред тога, смањењем радијуса прстена повећава се слободан спектрални опсег филтра са микропрстенастим резонатором, што је, наравно, пожељна карактеристика. Са друге стране, смањење радијуса прстена доводи до повећања радијационих губитака. Како би се радијациони губици смањили приступило се повећању индекса преламања језгра, што је ограничено расположивом технологијом.

Повећање у густини интеграције код ране технологије, силицијум на супстрату од силицијума, било је лимитирано врло малом разликом индекса преламања између језгра и супстрата. Полупречник резонатора при примени те технологије био је неколико центиметара. Значајан помак у густини интеграције се јавио код технологије код које је силицијум-окси-нитрид коришћен за језгро, при чему се добио много већи контраст индекса преламања, око 3,3 %, између језгра и супстрата од силицијума. То је омогућило смањење радијуса прстена на димензије испод 1 μm . Следеће, још веће, смањење је постигнуто код SOI (силицијум на изолатору) технологије. Веома велики однос индекса преламања између језгра од силицијума ($n=3,5$) и супстрата од силицијум диоксида ($n=1,45$) омогућио је да се таласоводно језгро смањи на субмикронски попречни пресек, док се још увек одржава мономодна пропација у опсегу телекомуникационих таласних дужина од 1,3 до 1,5 μm . Код ове технологије је полупречник прстенастог резонатора микрометарских димензија, чиме је назив микропрстенасти резонатор постао пригодан.

Анализа микропрстенастих резонатора најчешће се базира на семи-аналитичкој теорији спрегнутих модова (Coupled mode theory). Ова теорија се показала као задовољавајућа у случајевима када је полупречник прстена довољно велики, односно када је однос индекса преламања између прстена и супстрата приближно једнак јединици. Метода се стандардно користи у анализи "add and drop" мултиплексера на бази силицијум-окси-нитрида.

Када однос индекса преламања постане значајно већи од јединице, теорија спрегнутих модова уноси неприхватљиву грешку. Из тог разлога је код резонатора у облику прстена са полупречником малих димензија, односно са великим односом индекса преламања, потребно применити неку од нумеричких метода које директно решавају Хелмхолмцову једначину.

Нумеричке методе које се највише користе за решавање Хелмхолмцове једначине су метода коначних елемената (FEM) и метода коначних разлика у временском домену (FDTD). Ове методе су захтевне у погледу ресурса рачунара. FDTD је мање захтевна по питању ресурса рачунара, веома је ефикасна код униформних мрежа, али уноси грешку приликом моделовања закривљених геометрија. Код микропрстенастих резонатора по природи проблема је пожељна неуниформна дискретизација прорачунског домена, што даје предност методи коначних елемената. Поред тога FDTD метода није посебно ефикасна у варијантама прорачуна у фреквенцијском домену.

У литератури се могу наћи решења прорачуна микропрстенастог резонатора методом коначних елемената у две димензије, при чему се занемарује трећа, вертикална димензија. Овом приступу се прибегавало због знатно мањих захтева за ресурсима рачунара у односу на моделовање у три димензије. Структура микропрстенастог резонатора, међутим, није хомогена у вертикалној равни, јер се испод прстена налази супстрат, чији је индекс преламања код резонатора са смањеним радијусом знатно мањи од индекса преламања прстена, тако да се трећа димензија не може избећи. Поред конфигурације са латералним спрезањем, код које су линеарни таласоводи и прстенасти део у истој равни, микропрстенасти резонатори се јављају и у вертикалној конфигурацији, односно конфигурацији у којој је прстенасти део постављен изнад линеарних таласовода, а која је инхерентно тродимензионална.

Предмет истраживања у овој дисертацији је анализа микропрстенастог резонатора са великим односом индекса преламања између таласоводног дела и супстрата (однос 2:1) применом методе коначних елемената. Истраживање би требало да укључи одређивање параметара индивидуалних микропрстенастих резонатора, као и анализу и синтезу филтара вишег реда, који се састоје од неколико микропрстенастих резонатора чији би међусобни утицај требало испитати.

Циљеви истраживања у овој дисертацији су утврђивање границе применљивости теорије спрегнутих модова у анализи микропрстенастог резонатора, имајући у виду повећање односа индекса преламања, односно до ког граничног односа индекса преламања ова теорија даје прихватљиве резултате. Циљ је такође одређивање преносне карактеристике вишестепених филтара у зависности од геометрије и параметара резонатора, а за услове при којима теорија спрегнутих модова не даје задовољавајуће резултате, већ је потребно применити методу коначних елемената.

Релевантни библиографски извори:

1. Bogaerts, Wim, Peter De Heyn, Thomas Van Vaerenbergh, Katrien De Vos, Shankar Kumar Selvaraja, Tom Claes, Pieter Dumon, Peter Bienstman, Dries Van Thourhout, and Roel Baets. *Silicon microring resonators*. Laser & Photonics Reviews 6, No. 1, 2012, pp. 47-73,

2. Biberman, Aleksandr, Nicolás Sherwood-Droz, Xiaoliang Zhu, Kyle Preston, Gilbert Hendry, Jacob S. Levy, Johnnie Chan, Howard Wang, Michal Lipson, and Keren Bergman. *Photonic network-on-chip architecture using 3D integration*. In Proc. of SPIE Vol, vol. 7942, 2011, pp. 79420M-1 – 7920M-4,
3. Biberman, Aleksandr, Nicolás Sherwood-Droz, Xiaoliang Zhu, Michal Lipson, and Keren Bergman. *High-speed data transmission in multi-layer deposited silicon photonics for advanced photonic networks-on-chip*. In *CLEO: Science and Innovations*. Optical Society of America, 2011,
4. Biberman, Aleksandr, Hugo L. Lira, Kishore Padmaraju, Noam Ophir, Michal Lipson, and Keren Bergman. *Broadband CMOS-compatible silicon photonic electro-optic switch for photonic networks-on-chip*. In Conference on Lasers and Electro-Optics. Optical Society of America, 2010,
5. Shacham, Assaf, Keren Bergman, and Luca P. Carloni. *On the design of a photonic network-on-chip*. In Proceedings of the First International Symposium on Networks-on-Chip, 2007, pp. 53-64,
6. Barwicz, Tymon, Miloš A. Popović, Michael R. Watts, Peter T. Rakich, Erich P. Ippen, and Henry I. Smith. *Fabrication of add-drop filters based on frequency-matched microring resonators*. Journal of lightwave technology 24, No. 5, 2006, pp. 2207,
7. Schwelb, Otto, and István Frigyes. *Vernier operation of series-coupled optical microring resonator filters*. Microwave and Optical Technology Letters 39, no. 4, 2003, 257-261.

3. Полазне хипотезе

Теорија спрегнутих модова има своја ограничења у примени по питању односа индекса преламања између таласоводног дела и супстрата и није у стању да адекватно прати развој технологије интегрисане оптике. У области ограничења примене теорије спрегнутих модова, метода коначних елемената је адекватна замена. Применом методе коначних елемената је могуће извршити синтезу филтара вишег реда жељених карактеристика.

4. Научне методе истраживања

Имајући у виду целину истраживања, а ради достизања постављених циљева и верификацију постављених хипотеза, у истраживачком поступку за одређивање границе применљивости теорије спрегнутих модова од научних метода биће примењено моделовање и компаративна анализа, док ће код синтезе филтара бити примењене методе моделовања, анализе и синтезе.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ова дисертација да следеће научне доприносе:

- Упоређење нумеричких и семи-аналитичких метода којима се могу анализирати оптички филтри са микропрстенастим резонатором, при чему треба истаћи мане и предности појединих метода.
- Утврђивање границе применљивости теорије спрегнутих модова, која се најчешће користи при анализи структура са малим променама индекса преламања, у анализи оптичких филтара са микропрстенастим резонатором.
- Утврђивање исплативости примене методе коначних елемената у погледу времена и ресурса рачунара, а у ситуацијама када теорија спрегнутих модова не даје задовољавајуће резултате.
- Утврђивање утицаја међусобне спреге више резонатора у структурама вишестепених филтара са микропрстеном различитих конфигурација, а код којих је однос индекса преламања између језгра таласовода и супстрата релативно велики.
- Одређивање оптималних параметара оптичких филтара са микропрстенастим резонатором који би послужили као елементи за пројектовање оваквих филтара.

6. План истраживања и структура рада

У својој дисертацији, кандидат би прво дао преглед различитих конфигурација микропрстенастог резонатора и његове спреге са оптичком магистралом у оптичким филтрима. Након тога би дао преглед основних метода које се користе у анализи микропрстенастог резонатора. Потом би кандидат приступио утврђивању границе применљивости семи-аналитичке теорије спрегнутих модова, на којој је заснована једна од најчешће коришћених метода за анализу филтара са микропрстенастим резонатором, а у погледу праћења параметара оптичких таласовода које диктира напредак технологије. Након тога, кандидат би требало да приступи нумеричкој анализи неколико типичних модела филтара применом методе коначних елемената и да утврди утицај њихових оптичких и геометријских параметара на карактеристике преносних функција филтара. Тиме би биле одређене карактеристике оптичких филтара неопходне за њихово пројектовање.

7. Закључак и предлог

Предложена тема докторске дисертације је научно врло интересантна, актуелна је и погодна за истраживање. Напредак технологије довео је до промене оптичких и геометријских параметара оптичких филтара са микропрстенастим резонатором, што намеће потребу за утврђивањем границе применљивости досадашњих метода за анализу ових филтара и проналажењем нових метода које ће заменити старе. Током израде дисертације кандидат треба да одреди границе применљивости семи-аналитичке теорије спрежања модова између микропрстенастог и линеарног таласовода у оптичким филтрима, а при промени параметара које диктира напредак технологије - смањењу димензија микропрстена и повећању разлике у индексима преламања између различитих елемената филтра. Кандидат треба такође да дефинише и верификује

нумеричке методе за анализу и синтезу филтара за вредности параметара за које претходно поменута теорија не даје задовољавајуће резултате. Тиме су јасно дефинисани циљ истраживања, основне хипотезе и очекивани допринос дисертације.

Искуство и теоријско знање које је мр Бојан Милановић стекао у досадашњем раду на магистарским студијама, као асистент на Војној академији у Београду на предметима Електротехника, Електромагнетика и Микроталасна техника, као и више радова које је објавио а у којима се примењују нумеричке методе неопходне за рад на анализи оптичких таласовода (2 рада у часопису са СЦИ листе и 11 радова у зборницима са међународних и домаћих конференција), у потпуности га квалификују за рад на предложеној теми.

На основу свега наведеног Комисија сматра да кандидат **мр Бојан Милановић** испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације и да је тема научно заснована. Сходно томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да одобри **мр Бојану Милановићу** израду докторске дисертације под насловом: **“Одређивање карактеристика оптичких филтара са микропрстенастим резонатором применом методе коначних елемената”**.

Тема припада ужој научној области Физичка електроника, за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан. Комисија предлаже ванредног професора Јована Елазара за ментора.

Београд, 30. мај 2013.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Јован Елазар , ванр. проф.
Електротехнички факултет
Универзитета у Београду

.....
др Бранислав Рађеновић, науч. саветник
Инстит за физику, Београду

.....
др Бранко Колунџија, ред. проф.
Електротехнички факултет
Универзитета у Београду