

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U BEOGRADU

Na 751. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu održanoj 03.07.2012. godine određeni smo za članove Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije **mr Tatjane Keča** pod naslovom “**Modelovanje i dizajn optičkih rezonatora u integrisanoj silicijumskoj tehnologiji**”. Nakon pregleda dobijenog materijala, Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

Podaci o kandidatu

Tatjana Keča je rođena u Sarajevu 1967. godine. Osnovnu i srednju školu je završila u Beogradu. Elektrotehnički fakultet je upisala 1986. godine a diplomirala 1991. godine na odseku Tehnička fizika i smeru Elektrotehnički materijali. Postdiplomske studije na istom fakultetu je upisala 1993. godine a magistarski rad pod nazivom “Istraživanje rasejanja laserskog zračenja na višeslojnim cilindrima” pod rukovodstvom prof. dr Jovana Elazara, odbranila je 1996. godine. Tema magistarskog rada je iz oblasti laserske tehnike. Trenutno je zaposlena kao predavač u Visokoj školi strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije, gde radi od 1995.godine.

Tokom svoje dosadašnje karijere Tatjana Keča je bila autor 1 rada u međunarodnom časopisu (sa *impact* faktorom), 4 rada na međunarodnim konferencijama i 5 radova na domaćim konferencijama:

- [1] **T. Keča**, P. Matavulj, W. Headley and G. Mashanovich. Free spectral range adjustment of a silicon rib racetrack resonator. *Physica Scripta*, **T149** (2012) 014031 (4pp). (ISSN 0031-8949) [IF 1.204; M22]

- [2] P. Matavulj, **T. Keča**. Influence of Geometric Parameters on the SOI Racetrack Resonator Properties. *Progress In Electromagnetic Research Symposium Proceedings (PIERS2012)*, pp. 13-17, Moscow, Russia August 19-23, 2012. (ISBN: 978-1-934142-22-6)
- [3] **Keča T**, Matavulj P, Headley W and Mashanovich G. FSR adjustment of silicone rib racetrack resonator. Abstract P.OE.8., *III International School and Conference on Photonics*, 29.08.-02.09., Belgrade, Serbia, 2011.
- [4] **T. Keča**, P. Matavulj, W. Headley, G. Mashanovich. Modelling of Silicon Racetrack Resonator. *MediNANO3 - 3rd Mediterranean Conference on Nanophotonics*, 18-19.10., Belgrade, Serbia, 2010.
- [5] S. Stankovic, B. Timotijevic, P. Y. Yang, J. Crnjanski, M. Milosevic, **T. Keca**, P. Matavulj, G. Z. Mashanovich. Silicon Photonic Waveguides for Near- and Mid-Infrared Regions. Abstract THU_41, *International School and Conference on Optics and Optical Materials (ISCOM2007)*, 03-07.09., Belgrade, Serbia, 2007.

- [6] **T. Keča**, P. Matavulj, G. Mashanovich. Prenosne funkcije za polarizaciono zavisno prostiranje optičkih signala kroz prstenast resonator. *Elektronski zbornik LIII konferencije ETRAN*, rad MO5.3-1-4, Vrnjačka Banja, juni 2009.

- [7] **T. Keča.** Rezultati rasejanja laserskog zračenja na optičkim vlaknima. *Zbornik XLI konferencije ETRAN*, vol. 4, pp. 129-132, Zlatibor, juni 1997.
- [8] **T. Keča, J. Elazar.** Rasejanje laserskog zračenja na dvoslojnom beskonačnom cilindru. *Zbornik XXXVII Konferencije ETRAN*, vol. 9, pp. 197-202, Beograd, septembar 1993.
- [9] D. M. Todorović, P. M. Nikolić, **T. Keča**, M. P. Dimitrijević. Ispitivanje toplotnih karakteristika tankih filmova GeSe i $\text{GeSe}_x\text{S}_{1-x}$ fotoakustičnom metodom. *XII Savetovanje o savremenim neorganskim materijalima (ETTRAN)*, Kopaonik, 1992.
- [10] D. M. Todorović, P. M. Nikolić, **T. Keča**, D. G. Vasiljević. Ispitivanje toplotnih karakteristika tankih filmova fotoakustičnom metodom. Rad 1.1.6., *Zbornik I srpske konferencije o mikro i optoelektronici*, Beograd, 1992.

Doprinosi objavljeni u radovima [1]-[6] predstavljaju deo osnovnih rezultata istraživanja koji će biti izloženi u doktorskoj disertaciji kandidata. Ovi doprinosi biće dopunjeni rezultatima koji do sada nisu publikovani i čije se publikovanje očekuje u narednom periodu.

Tatjana Keča je učestvovala u jednom projektu Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije:

Istraživanje rasejanja laserskog zračenja na dvoslojnim dielektričnim cilindrima. *Pojekat Ministarstva za nauku Republike Srbije*, 1994-1996.

Na osnovu dosadašnjeg naučnoistraživačkog rada i publikovanih naučnih rezultata Komisija zaključuje da je kandidat Tatjana Keča kvalifikovana za izradu doktorske disertacije na predloženu temu.

Analiza teme

Predmet i cilj istraživanja

Prenos informacija i signala je jedna od oblasti elektrotehnike koja se najbrže razvija i pod stalnom je lupom klijenata koji imaju sve veće zahteve za sve bržim, tačnijim ali i jeftinijim prenosom podataka. Telekomunikacioni sistemi i mreže bazirani na bakarnim provodnicima su dugo pratili te zahteve uvođenjem novih i naprednijih tehnologija, ali njihova ograničenja su postajala sve očiglednija što su zahtevi više rasli. Optički sistemi prenosa polako preuzimaju primat u telekomunikacijama, zahvaljujući većoj brzini signala, višem propusnom opsegu i mogućnostima koje imaju tehnike multipleksiranja. Pored toga, optički provodnici (talasovodi) su manje podložni uticaju elektromagnetskih smetnji i signali su zaštićeniji u smislu zaštite privatnosti. Jedna od najvećih mana, njihova cena, polako gubi na važnosti.

Jedno od rešenja kako smanjiti cenu optičkih komponenti je integrisana tehnologija tj. proizvodnja optičkih čipova koji bi sadržavali sve neophodne komponente za detekciju, konverziju, rutiranje, modulaciju i pojačanje signala [1,2]. Integrisane fotonske komponente se danas razvijaju na velikom broju različitih materijala: silicijum, SOI (*Silicon On Insulator*), litijum-niobat, indijum-fosfid, galijum-arsenid, safir, grafen, polimeri... Posebno mesto zauzima SOI struktura, zbog svoje niske cene i raznovrsnih proizvodnih mogućnosti. Sa stanovišta fizike provođenja interesantna je pre svega zbog velike razlike u indeksima prelamanja silicijuma i silicijum-dioksida i činjenice da ima male gubitke u bliskoj infracrvenoj oblasti. Zato se danas fotonska integrisana kola najčešće prave kao skup isprepletenih optičkih SOI komponenti. Procesi proizvodnje SOI čipova imaju ključnu ulogu u kvalitetu komponenti koje se na njima nalaze [3]. Separacija implantiranim kiseonikom (*Separation by IMplanted OXYgen – SIMOX*) podrazumeva ubrizgavanje jona kiseonika u silicijumsku podlogu, čime se stvara ukopani sloj silicijum-dioksida. Za takve strukture su mereni najmanji gubici prostiranja u ravnom rebrastom (rib) talasovodu, od 0 dB/cm do 0.5 dB/cm [4]. Gubici prilikom prostiranja su značajan parametar jer mogu imati štetan efekat na funkcionalnost rezonatora.

Optički rezonatori su posebna vrsta direkcionih spreznjaka kod kojih je drugi talasovod zatvoren i oblika sličnog prstenu (*ring, racetrack*). Dva najbitnija fizička procesa koja prate prostiranje u takvoj strukturi su sprezanje u direkcionom kapleru i delimična promena polarizacionog stanja u zatvorenom talasovodu. Rastojanje između pravolinijskog i zatvorenog talasovoda određuje efikasnost kaplovanja, a time i kvalitet uređaja. Sprezanje je efikasnije za manja rastojanja, ali je smanjenje ograničeno procesom proizvodnje. Zakrivljenost prstenastog talasovoda omogućava polarizacionu konverziju, ali ako je poluprečnik krivine premali, postoji rizik da signal napusti talasovod. Zbog toga je dimenzionisanje pri projektovanju rezonatora, ali i preciznost u procesu proizvodnje ključni problem. U zavisnosti od dimenzija i strukture, rezonator može obavljati različite funkcije: modulator, multiplekser/demultiplekser, filter, ruter i sl. Imajući u vidu sve te mogućnosti, ali i činjenicu da su dimenzije poprečnog preseka rezonatora samo nekoliko desetina kvadratnih mikrometara, njihovo dalje proučavanje i korišćenje u fotonskim čipovima ima perspektivnu budućnost, jer omogućava konstrukciju gusto integrisanih i skalabilnih komponenti u budućim optičkim komunikacionim sistemima i senzorima.

Teorijski modeli koji opisuju prostiranje svetlosti zasnivaju se uglavnom na modelu propagacije snopa - BPM (*Beam Propagation Model*) koji podrazumeva rešavanje potpunih vektorskih jednačina, pretpostavljajući rešenje u obliku talasne jednačine sa sporopromenljivom amplitudom [5]. Na BPM model se oslanja i teorija spregnutih modova - CMT (*Coupled Mode Theory*), kojom se na praktičan način mogu opisati oba relevantna fizička procesa u optičkom rezonatoru [6]-[12].

U okiru ove teze će postojeći CMT model biti proširen uvođenjem pretpostavke da svetlost koja u procesu sprezanja pređe u zatvoreni talasovod može u njemu da kruži izvesno vreme pre nego što se istim procesom vrati u pravolinijski deo i napusti rezonator. Transfer funkcija koja opisuje prostiranje kroz rezonator dobijena na taj način ima dva rezonantna minimuma u okviru jednog slobodnog spektralnog opsega - FRS (*Free Spectral Range*) intervala, kao što pokazuju i eksperimentalno dobijeni podaci. Pojava dva rezonantna minimuma je posledica međusobnog delovanja TE (transverzalno-električnog) i TM

(transverzalno-magnetnog) moda koji se dobijaju prilikom prostiranja. Analizom njihovog međusobnog uticaja se otvara mogućnost predikcije uslova za dobijanje polarizaciono nezavisnih optičkih rezonatora [13-14].

U nastavku su navedene neke od referenci iz postojeće literature koje su relevantne za predmet istraživanja.

- [1] Absrtreiter, G., *Engineering the future of electronics*, Physics World, 1992., 5(3): p.36-9.
- [2] Soref, R.A., Silicon-based optoelectronics, Proc.IEEE, 1993., 81(12): p.1687-706.
- [3] Read, G.T. and A.P. Knights, *Silicon Photonics: An Introduction*, 2004.: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Rickman, A. and G.T. Read, *Silicon-on-insulator optical rib waveguides: loss, mode characteristics, bends and y-junctions*. IEEE Proc.-Optoelectron.,1994., 141(6): p.391-3.
- [5] Obayya, S.S.A., B.M.A.Rahman, *Beam propagation modeling of polarization rotation in deeply etched semiconductor bent waveguides*, IEEE Photon.Technol. Lett., 2001., 13(7): p.681-3.
- [6] Yariv, A., *Coupled mode theory for guided-wave optics*, IEEE J. Quantum Electron., 1973., QE-9(9): p.919-33.
- [7] Huang, W.-P., *Coupled mode theory for optical waveguides: an overview*, 1994., J. Opt. Soc. Am. A., 11(3): p. 963-83.
- [8] Lui, W.W., T. Hirono, K. Yokoyama and W.P. Huang, *Polarization rotation in semiconductor bending waveguides: a coupled-mode theory formulation*, J. Lightwave Technol., 1998., 16(5): p.929-36.
- [9] Melloni, A., F. Morichetti, M. Martinelli, *Polarization conversion in ring resonator phase shifters*, 2004., Opt. Lett., 29(23): p.2785-7.
- [10] Cusmai, G., F.Morichetti, P.Rosotti, R.Costa and A.Melloni, *Circuit-oriented modelling of ring-resonators*, 2005., Opt. Quant. El. 37: p.343-58.
- [11] F.Morichetti, A.Melloni and M.Martinelli, *Effects of polarization rotation in optical ring-resonator-based devices*, 2006., J. Lightwave Technol. 24: p.537-85.
- [12] Kaplan, A., *Modeling of ring-resonators with tunable couplers*, 2006., IEEE J. Quantum Electron., 12(1): p.86-95.
- [13] Headly, W.R., G.T. Read, A. Liu, M. Paniccia and S. Howe, *Polarization-independent optical racetrack resonators using rib waveguides on silicon-on-insulator*, 2004., Appl. Phys. Lett., 85(23): p.5523-5.
- [14] Milošević, M., P.Matavulj, B. Timotijević, G.Read and G. Mashanovich, *Design rules for single-mode and polarization-independent silicon-on-insulator rib waveguides using stress engineering*, 2008, J. Lightw. Technol., 26(13): p.1840-6.

Polazne hipoteze

Na prostiranje svetlosti kroz gusto integrisane fotonske komponente ključnu ulogu imaju dimenzije i oblici talasovoda, kao i vrsta materijala od kog su napravljeni. S obzirom da će teorijski simulirani rezultati biti poređeni sa eksperimentalnim podacima dobijenim merenjem SOI čipova u disertaciji su razmatrani isključivo SOI rezonatori. Detaljan naglasak će biti dat na uticaj koji geometrijski parametri imaju na oblik prenosne funkcije rezonatora.

Geometrijski parametri optičkih rezonatora su podeljeni u dve grupe. Prva grupa obuhvata geometriju poprečnog preseka talasovoda, parametre čiji red veličine odgovara talasnoj dužini svetlosti koja se prostire kroz rezonator (1,55 μ m). Od njih pre svega treba izdvojiti širinu talasovoda, nagibni ugao bočne ivice rebra talasovoda i debljinu oksidnog sloja nanesenog preko aktivnog silicijumskog talasovoda, mada nije neuputno razmotriti i dubinu ecovanja rebrastog talasovoda. Geometrija poprečnog preseka igra presudnu ulogu u raspodeli polja, samim tim definiše uslove monomodnosti talasovoda, ali očekivano, ima

zanemarljiv uticaj na globalno prostiranje kroz rezonator. Međutim, ovi parametri bi se mogli iskoristiti za fina podešavanja odnosa prostiranja dva polarizaciona stanja kroz rezonator, TM i TE moda.

Druga grupa geometrijskih parametara čiji će uticaj na rad rezonatora biti detaljno objašnjen je posledica geometrije samog prstena (savijenog, zatvorenog talasovoda). On može biti potpuno kružan (*ring*) ili izdužen, sa paralelnim pravolinijskim segmentima (*racetrack*). U slučaju izduženog talasovoda pravolinijski delovi su polovine direkcionih sprežnjaka, te će njihova dužina, kao i poluprečnik krivine zakrivljenog dela biti dominantni parametri koji će uticati na funkciju rezonatora. Dužina direkcionog sprežnjaka (područja sprezanja) direktno definiše intenzitet sprezanja. Naravno, ogroman uticaj na sprezanje ima i rastojanje između talasovoda u sprežnjaku, ali je dužina područja parametar kojim je mnogo lakše podešavati potrebni ili zadati koeficijent sprezanja. Od zakrivljenosti savijenog dela talasovoda zavisi intenzitet promene polarizacionog stanja koji se u njemu događa. Upravo je proces delimične promene polarizacionog stanja zaslužan za činjenicu da se u izlaznom spektru svetlosti uvek vide oba moda, TE i TM, bez obzira na stanje polarizacije ulazne svetlosti.

U realnoj situaciji svetlost nekoliko puta promeni polarizaciju u prstenastom delu talasovoda pre nego što se vrati u pravolinijski talasovod i napusti rezonator. U tom slučaju je okretanje polarizacije intenzivnije, pa će se na prenosnoj funkciji videti minimumi ne samo na rezonantnoj talasnoj dužini ulaznog polarizacionog moda, već i na rezonantnoj talasnoj dužini suprotnog polarizacionog stanja. Pojavljivanje dodatnog minimuma smanjuje FSR fotonskog uređaja a samim tim i njegov kvalitet.

Podešavanjem geometrijskih parametara rezonatora mogli bi se unapred predvideti svi aspekti prostiranja svetlosti u takvoj integrisanoj fotonskoj strukturi čime bi uveliko bilo olakšano projektovanje i složenijih uređaja koji se dobijaju dodavanjem i uparivanjem novih pravolinijskih ili zatvorenih talasovoda.

Naučne metode istraživanja

Prostiranje elektromagnetskih talasa u fotonskim komponentama sa osvrtom na rebraste talasovode, pravolinijske i zakrivljene, kao i direkcione sprežnjake, što čini strukturu optičkog rezonatora će biti izvedeno na osnovu postojećeg CMT modela. Biće izvedene prenosne matrice i transfer funkcije koje opisuju relevantne fizičke procese, sprezanje u direkcionom sprežnjaku i delimičnu promenu polarizacionog stanja u zakrivljenim delovima talasovoda, koji se događaju pri prostiranju svetlosti kroz optički rezonator. Korišćenjem predloženog modela će biti proračunati odzivi rezonatora različitih dimenzija. Od geometrijskih parametara optičkih rezonatora razmatraće se dužina područja sprezanja, poluprečnik krivine talasovoda, širina talasovoda, inklinacioni ugao, te oblik i debljina oksidnog sloja. Proračuni će biti izvedeni pomoću COMSOL i MATLAB programskih paketa. Na osnovu toga će biti opisani uticaji svih relevantnih parametara na funkciju rezonatora. Detaljno će biti razmatran uticaj koji svi relevantni parametri imaju na oblik transfer funkcija, njegov FSR i položaj rezonantnih talasnih dužina za oba polarizaciona moda, TE i TM. FSR je zanačajan parametar svakog optičkog sistema, a proučavanje položaja rezonantnih minimuma otkriva razlike i međusobni uticaj ortogonalnih modova na prostiranje.

Postojeći model će biti inoviran tako da simulira realan odziv uvođenjem pojma višestrukih prolaza elektromagnetskih talasa u rezonatorskoj strukturi. Ova inovacija otvara mogućnosti predikcije i projektovanja odziva rezonatora u realnim uslovima. Svi dosadašnji modeli i jednačine izvedene na osnovu njih su podrazumevali da signal samo jednom prolazi kroz rezonator. Predloženi model, koji će biti proveren poređenjem sa eksperimentalno dobijenim odzivima optičkog rezonatora različitih dimenzija, adekvatnije će simulirati realan fizički proces prostiranja talasa. Na ovaj način biće izvršena korekcija polaznog modela i provera početnih pretpostavki.

Očekivani naučni doprinos

Na osnovu iscrpne analize fizičkih procesa koji se odvijaju u optičkim rezonatorima ostvarene kroz pregled literature i eksperimentalno i teorijsko istraživanje očekuju se sledeći rezultati:

1. Sveobuhvatan i šematizovan pregled procesa prostiranja TE i TM modova u rezonantnim strukturama;
2. Detaljan opis uticaja geometrijskih parametara na odziv optičkog rezonatora;
3. Definisanje modela koji će adekvatnije simulirati realan fizički proces prostiranja talasa;
4. Potvrđivanje modela uparivanjem teorijskih i eksperimentalnih rezultata istraživanja.

U cilju unapređenja teorijskog objašnjenja procesa prostiranja signala kroz optički rezonator neophodno je sagledati sve do sada objavljene rezultate i tumačenja vezana za ovu oblast. Sistematizovan i šematizovan pregled različitih fizičkih procesa koji se događaju prilikom prostiranja, a koji će biti dati u okviru ovog rada, predstavljaju polaznu tačku u istraživačkom radu usmerenom ka razvoju adekvatnog teorijskog modela.

Proučavanje uticaja geometrijskih parametara je neophodno za predikciju i projektovanje optičkog rezonatora uprkos malim varijacijama koje se neizbežno javljaju u procesu proizvodnje. S obzirom na dimenzije integrisanih optičkih struktura, samim tim i optičkih rezonatora, mala odstupanja od nominalnih geometrijskih vrednosti mogu imati značajan uticaj ne samo na prostiranje signala, već i na funkciju rezonatora.

Predloženi model će za razliku od dosada korišćenih, adekvatnije simulirati realan fizički proces prostiranja talasa kroz rezonator i na taj način prevazići uočene nedostatke. Ovakav model otvara mogućnost proširenja primene i na drugačije fotonske strukture i predstavlja prvi, neophodan korak u projektovanju automatizovanog sistema, kao što će biti predloženo u zaključku rada.

Plan istraživanja i struktura rada

Plan istraživanja predložene doktorske disertacije sadrži sledeće aktivnosti:

- Temeljan pregled postojeće literature u oblasti prostiranja kroz integrisane optičke rezonatore. Sumiranje i sistematizacija objavljenih rezultata sa akcentom na procese sprezanja u direkcionom kapleru i delimične promene polarizacionog stanja u prstenastom talasovodu.
- Kratak osvrt na proces fabrikacije SOI struktura separacijom implantiranim kiseonikom sa naglaskom na fabrikaciju optičkih rezonatora.
- Detaljna analiza uticaja relevantnih geometrijskih parametara optičkih rezonatora na prostiranje svetlosti, sa naglaskom na razlike u prostiranju ortogonalnih transverzalnih modova, TE i TM. Analiza karakteristika prenosnih funkcija rezonatora, FSR-a i položaja rezonantnih minimuma za različite geometrijske parametre.
- Modelovanje prostiranja kroz optički rezonator simulacijom višestrukih prolaza kroz prstenast talasovod. Primena stečenih znanja o uticaju geometrijskih parametara za finu korekciju razlika u prostiranju transferzalnih modova.
- Poređenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata, analiza odstupanja, korekcija i unapređenje modela kako bi se ostvarilo što bolje poklapanje.
- Analiza mogućnosti automatizacije teorijske simulacije za korišćenje u drugim integrisanim strukturama sličnog tipa.

Doktorska disertacija će biti organizovana na sledeći način: nakon opšteg uvoda, u okviru prvog poglavlja biće dat pregled fizičkih zakona i procesa koji opisuju proces prostiranja svetlosti u integrisanim optičkim strukturama. Na osnovu pregleda će biti izvedene prenosne matrice i funkcije kojima se može opisati prostiranje u optičkim rezonatorima. Drugo poglavlje biće posvećeno detaljnoj analizi uticaja geometrijskih parametara rezonatora na oblik prenosne funkcije i njegovu funkcionalnost. Inoviran model

prostiranja kroz rezonator simulacijom sistema višestrukih prolaza biće izložen u trećem poglavlju. Osnovni podaci vezani za fabrikaciju SOI optičkih struktura i merenja prenosnih funkcija izvršena na optičkim rezonatorima biće izneseni u poglavlju četiri. U okviru petog poglavlja unapređeni model prostiranja će biti upoređeni sa eksperimentalnim podacima, i u tom svetlu analizirani i diskutovani. Zaključna razmatranja biće izložena u šestom poglavlju.

Zaključak i predlog

Na osnovu izloženog, Komisija smatra da kandidat mr Tatjana Keča ispunjava sve formalne i suštinske uslove za pristupanje izradi doktorske disertacije, kao i da je predložena tema naučno aktuelna u oblasti integrisane optoelektronike. Stoga, predlažemo Veću da kandidatu odobri izradu doktorske disertacije pod radnim naslovom “Modelovanje i dizajn optičkih rezonatora u integrisanoj silicijumskoj tehnologiji” i rukovodstvom mentora dr Petra Matavulja, vanrednog profesora.

Beograd, 09. 10. 2012.

dr Petar Matavulj, vanredni profesor
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Goran Mashanovich, Lecturer
Faculty of Physical and Applied Sciences,
University of Southampton, UK

dr Jovan Radunović, redovni profesor
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Dejan Gvozdić, redovni profesor
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Jovan Elazar, vanredni profesor
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu