

Karakterizacija in kritično vrednotenje fluorimetrične sonde iz sedemjedrnega optičnega vlakna

Ahmed Samir^{1,2}, Boštjan Batagelj^{1,3}

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Ain Shams University, Faculty of Science, Physics department, Cairo, Egypt

³ COBIK, Tovarniška 26, 5270 Ajdovščina, Slovenija

E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu je predlagana nova integrirana visokoučinkovita steklena sedem-jedrna vlakenska fluorometrična sonda. Zasnovana sonda inovativno združevanje funkciji zajema svetlobe in optičnega filtriranja s pomočjo presluhov v večjedrnem optičnem vlaknu. Za namene njene karakterizacije in kritičnega vrednotenja je bil razvit numerični model razširjanja svetlobe v večjedrni strukturi svetlovodov, ki omogoča optimizacijo valovno-snovnih lastnosti večjedrne vlakenske sonde za to biokemijsko aplikacijo. Rezultati, pridobljeni s simulacijami, so primerjani z meritvami prenosne karakteristike v tretjem spektralnem oknu in kažejo precejšnje ujemanje glede periode in modulacijske globine prenosne funkcije. Frekvenčni premik se pripisuje odstopanju v dolžini sedemjedrnega optičnega vlakna, ki je nastalo zaradi nenatančnega rezanja vzorca.

Ključne besede: večjedrno vlakno, fluorescenčna sonda, naprava za filtriranje valovnih dolžin, spektralno filtriranje

Characterization and evaluation of a seven-core fiber-optic fluorometer probe

The purpose of this paper is to highlight the recent progress and trends in the development of leading-edge, fiber-optic probes that address the current challenges in the spectroscopy-based biophotonics techniques, including fluorescence. In the fluorometer, a light source emits the excitation light and a detector senses the emitted light that is relevant to the biochemical media to be measured. After the invention of the optical fiber, the light guided into the media plays a crucial role in the fluorescence spectroscopy.

In this paper we are looking at uses of multi-core fibers as a fluorometer fiber probe that pushes the current capabilities of sensing in biochemical environments. We describe the technology that is directly used for the fabrication of the multi-core fiber and motivated by the need for photonic signal processing, such as the filtration of optical signals. The stack-and-draw process is used for the fabrication of a seven-core fiber. With seven cores we collect the emitted fluorescence, which is then guided into the central core and filtered by the frequency-dependent, multi-core fiber transfer function. The multi-core fiber, which acts as a filter, blocks other wavelengths, but transmits the wavelengths relevant to the biochemical media. A proper selection of the filter transmission function is crucial and requires familiarity with the emission and excitation spectrum.

In our research we use several single-mode fiber – multi-core fiber – single-mode fiber (SMS) structures, which differ in terms of their lengths. The seven-core fiber probe is characterized by using the computed and experimental transmission spectra. The results from numerical simulations of a 3D full-vectorial model are compared with 30, 40, 60 and

80 cm SMS samples in the third spectral window. The period and modulation depth of the simulations and measurements coincide exactly. The frequency shift observed in the transfer characteristics is a consequence of the inaccurate cutting of the seven-core fiber length that is part of the spliced SMS structure.

Keywords: multi-core fiber, fluorescent probe, wavelength filtering device, spectral filtering

1 UVOD

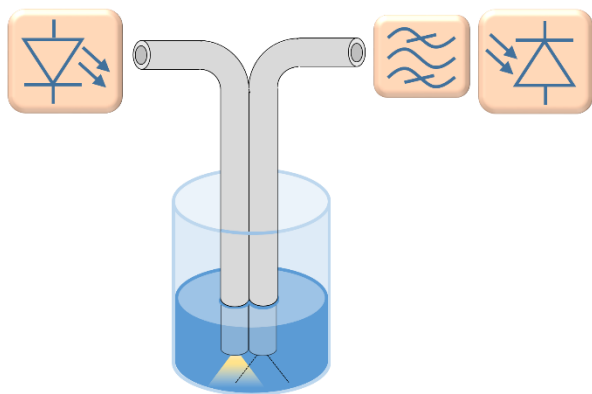
Fluorometrija je analitična metoda za kvantitativno oceno merjenja bioloških in kemičnih lastnosti snovi na podlagi fluorescentne svetlobe, ki izhaja iz različnih vzorcev in materialov, kadar so le-ti obsevani s svetlobo določene valovne dolžine. Naprave, ki karakterizirajo zvezo med absorbirano in izsevano svetlobo na podlagi pojava fluorescentne svetlobe, se imenujejo fluorometri in so lahko realizirani na različne tehnične načine. Ker prostozračne izvedbe fluorometrije zahtevajo zelo natančno nameščanje optičnih elementov, je za izvedbo fluorometra zelo atraktivno in pogosto uporabljeno vodenje svetlobe s pomočjo vlakenskih optičnih sond različnih geometrijskih izvedb in materialnih lastnosti.

Naloga vsakršne vlakenske optične sonde za namene fluorometrije je dvojna. Najprej mora zagotoviti dovajanje svetlobe od vzbujevalnega izvora neposredno na izbrano točko merjenja, pri čemer mora vnašati čim manjše slabljenje zaradi sipanja ali absorpcije v notranjosti svetlovoda. Druga naloga pa je zbiranje

fluorescence, ki izhaja iz vzorca, in vodenje sprejetega signala na ustrezni selektivni fotodetektor, pri čemer je prav tako treba paziti na čim manjše slabljenje zaradi sipanja ali absorpcije v svetlovodu. Uporabljeno optično vlakno je lahko enorodovno ali mnogorodovno in izdelano iz različnih materialov, pri čemer pa je treba še zlasti paziti na izbiro in uporabo materialov v jedru optičnega vlakna, po katerem potuje svetloba, kjer morajo le-ti imeti nizko sipanje in absorpcijo. Splošno znano je, da so optične vlakenske sonde zelo kompaktne, majhnih dimenzij, mehansko prilagodljive, odporne proti zunanjim elektromagnetnim motnjam, cenovno ugodne in omogočajo merjenje pojava fluorescence tudi z relativno velike razdalje v nelaboratorijskem okolju.

Geometrijske porazdelitve svetlovodov pri fluorimetričnih sondah iz optičnih vlaken so prav tako lahko zelo različne [1]. Prva možnost je dvovlakenska fluorimetrična sonda, ki jo prikazuje slika 1. Pri dvovlakenski sondi je eno vlakno namenjeno vzbujanju vzorca in drugo zajemu fluorescentne svetlobe in vodenju le-te do detektorja. V biokemijskem vzorcu zaradi sipanja vzbujevalne svetlobe prihaja do presluha med zbrano fluorescenčno svetlobo in vzbujevalno svetlobo. Za ločevanje so potrebni optični filtri, ki zagotovijo potrebno razmerje med signalom in šumom, pri čemer se za signal šteje zbrana fluorescenčna svetloba, za šum pa vzbujevalna svetloba. Pri dvovlakenski fluorimetrični sondi geometrijsko neprekrivanje področji vzbujanja in zaznavanja privede do manjše učinkovitosti, zato so veliko primernejše druge geometrijske porazdelitve svetlovodov.

Druga geometrijska možnost porazdelitve svetlovodov je enojna fluorimetrična vlakenska sonda, pri kateri sta vzbujevalna in izsevna svetloba vodeni do vzorca po istem optičnem vlaknu. Dobra lastnost tovrstnih sond je predvsem visoka učinkovitost zaznane izsevane svetlobe, saj gre za popolno geometrijsko prekrivanje področja svetlobnega vzbujanja in zaznavanja, ki ga prek snovnih lastnosti narekuje numerična odprtina vlakna. Pri enovlakenskih



Slika 1: Fluorimetrična sonda iz dveh vlaken (levo vlakno za vzbujanje vzorca, desno za zajem sevane svetlobe)

fluorimetričnih sondah je treba na strani analize optičnega signala uporabiti kompleksnejše optične komponente za ločevanje obeh žarkov.

Tretja in v zadnjem času čedalje bolj atraktivna geometrijska možnost porazdelitve svetlovodov so večvlakenske fluorimetrične sonde, v katerih se za vzbujanje ali zbiranje fluorescence uporablja več kot eno optično vlakno. Vlakna so lahko razporejena linearno [2] ali krožno. Ker ima linearna porazdelitev slabo geometrijsko prekrivanje območja svetlobnega vzbujanja in zaznavanja, so veliko bolj zanimive krožne geometrijske porazdelitve. Pri krožni porazdelitvi optičnih vlaken se za obsevanje najpogosteje uporablja osrednje optično vlakno, preostala, ki ga obdajajo, pa tvorijo obroč ali več obročev vlaken, namenjenih za detekcijo. Količina zbrane svetlobe pri krožni geometrijski razporeditvi je odvisna od premera zbiralnega jedra in njegove numerične odprtine.

Pri zasnovi vseh vlakenskih fluorimetričnih sond je treba paziti, da jakost električnega polja vzbujevalne svetlobe na izhodu vzbujevalnih optičnih vlaken ne preseže površinskih gostot, ki bi povzročile fotokemično poškodovanje merilnega vzorca. Poškodovanje biokemijskega vzorca je toliko bolj nevarno pri uporabi zgolj enega vzbujevalnega vlakna, ki je enorodovno, saj na majhni površini izhodne ploskve jakosti električnega polja zlahka presežejo mejne vrednosti.

Vse do zdaj poznane fluorimetrične vlakenske sonde odlikuje učinkovito vodenje svetlobe od vzbujevalnega izvora do vzorca in naprej do sprejemnika, vendar pred fotodetektorskim sprejemnikom potrebujejo selektivno filtriranje vzbujevalne svetlobe in fluorescentne svetlobe. Selektivno filtriranje je izvedeno s pomočjo diskretnih optičnih filtrov, ki so lahko izdelani s pomočjo različnih tehnologij. Naloga optičnega filtra je izboljšanje razmerja med signalom in šumom na račun zavračanja močne vzbujevalne svetlobe, medtem ko se na fotodetektor prepusti šibka fluorescenčna svetloba. Ne glede na tehnologijo izvedbe optičnega filtra se zaradi njegove uporabe povečata kompleksnost in volumen opreme in ne nazadnje tudi zviša cena merilne postavitve.

Na podlagi poznanih geometrijskih rešitev porazdelitve optičnih vlaken in njihovih najpomembnejših značilnosti za detekcijo fluorescence s čim boljšim razmerjem med signalom in šumom je bila predlagana in razvita nova fluorimetrična sonda iz večjedrnega optičnega vlakna [3]. V tem članku je izvedena karakterizacija in kritično vrednotene nove fluorimetrične sonde iz steklenega sedemjedrnega optičnega vlakna.

2 ZASNOVA SONDE IZ VEČJEDRNEGA OPTIČNEGA VLAKNA

Pri večjedrnem optičnem vlaknu so mogoče različne geometrijske porazdelitve steklenih jeder, ki so v enem (prav tako steklenem) plašču lahko razporejeni v različne vzorce [4]. Potreben pogoj za vodenje svetlobe

po jedru je enak kot pri enojedrnem vlaknu – lomni količnik stekla, iz katerega je izdelano jedro, mora biti vedno večji od lomnega količnika stekla, iz katerega je izdelana obloga. Joder je v večjedrnem optičnem vlaknu lahko tudi več kot ducat. Geometrijske porazdelitve lahko vključujejo jedra enakih ali različnih premerov, po čemer ločimo homogena od heterogenih večjedrnih vlakenskih struktur.

Za geometrijsko strukturo večjedrnega optičnega vlakna, ki je nova fluorescenčna sonda, predlagamo sedemjedrno vlakno z optično sklopljenimi jedri. Sedemjedrno vlakno je izbrano zaradi preproste homogene porazdelitve, pri kateri so razdalje med sosednjimi jedri enakega polmera enake. Tovrstna heksagonalna porazdelitev se izkaže kot najprimernejša za iskanje analitičnih rešitev, izvedbo numeričnih simulacij in praktično izdelavo vključno s končnim geometrijskim preizkusom homogenosti.

Predlagana sonda je sestavljena iz osrednjega jedra, ki se uporablja za oddajanje in sklapljanje vzbujevalnega sevanja na preostalih zunanjih šest joder, nameščenih na obodu. V povratni smeri se svetloba višje valovne dolžine zajema na osrednjem jedru ali na zunanjih šestih jedrih in vodi na izhod osrednjega jedra. Valovna dolžina zajete svetlobe je pri fluorometriji čedalje večje valovne dolžine kot valovna dolžina vzbujevalne svetlobe, pri čemer njuno medsebojno razmerje narekujejo materiali, uporabljeni v biokemijski aplikaciji.

Uporaba vseh joder v primerjavi z enim samim jedrom vlakna za dostavo vzbujevalne svetlobe od vira do vzorca zmanjša tveganje za fotokemično poškodovanje vzorca. Povratno sevanje fluorescenčne oddaje, ki je na večjih valovnih dolžinah, se lahko zbira v zunanjih šestih jedrih, od koder je nato sklopljeno v osrednje jedro.

Nova sonda uporablja frekvenčno selektivno rodovno sklapljanje svetlobe iz jedra na jedro. Pri tem za filtracijo namesto montaže navadnih filtrov zmanjšata število potrebnih sestavnih delov in velikost merilne sonde.

2.1 Izračun optičnega sklopa med jedri

Za sklopa svetlobe iz jedra na jedro v večjedrnem homogenem in večjedrnem heterogenem optičnem vlaknu se lahko uporabi računaska teorija, ki je bila razvita in predstavljena za namene telekomunikacijskega prenosa [5]. Glede na medsebojno razdaljo med jedri v večjedrnem vlaknu se svetloba z enega na drugo vlakno lahko močnejše ali šibkeje sklaplja. Moč se sklaplja iz enega jedra v drugo v isti oblogi, ker se evanescentno polje, ki sicer upada eksponentno z oddaljenostjo od jedra, kjer se širi svetlobno valovanje, čutijo spremembe v lomnem količniku zaradi prisotnosti drugega jedra v bližini [6].

Kot posledica optičnega sklapljanja moči svetloba izmenoma potuje iz enega v drugo jedro in nazaj vzdolž vlakna. To periodično sklapljanje moči med jedri ima sinusni odziv. Dolžina, pri kateri je celotna moč prenesena iz enega v drugo jedro, se imenuje sklopna

dolžina. Periodična prenosna funkcija je uporabna za izdelavo optičnih elementov, kot so frekvenčno odvisni optični sklopniki oziroma razcepniki. Rezultat teoretske obravnave je analitični model za izračun sklopnega presluha. Izkaže se, da je sklopna dolžina odvisna od razdalje med jedri in valovne dolžine svetlobe, ki potuje po jedru optičnega vlakna [7].

Pri dvojedrnem vlaknu z identičnimi jedri se bo svetloba iz enega jedra v celoti prenesla v drugo jedro, ker za homogeni jedri velja enaka konstanta razširjanja. V primeru dveh heterogenih joder svetloba ne prehaja v celoti iz enega v drugo jedro, ker ima vsako jedro drugačno konstanto razširjanja valovanja.

Pri homogenem sedemjedrnem optičnem vlaknu z enakimi jedri, kjer je šest joder razporejenih okrog centralnega jedra, struktura narekuje zgolj dva sklopna koeficienta. Celotna moč prehaja iz centralnega jedra v preostala jedra, vendar je minimalna moč v centralnem jedru enaka sedmini celotne moči. V vsakem od šestih obodnih joder pa moč niha od nič proti sedmini celotne moči. Poleg analitske rešitve je sklop svetlobe med jedri večjedrnega vlakna oziroma presluhi med jedri proučen z numerično metodo končnih elementov oziroma metodo širjenja lastnih rodov (angl. eigen mode expansion method). Ta metoda se uporablja za izračun odbojnosti in prenosnega parametra v poljubnih slojih, na katere za namen modeliranja »narežemo« optično vlakno.

2.2 Izdelava sedemjedrnega vlakna

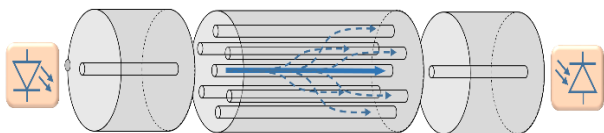
Na podlagi izračunov in simulacij je bilo zasnovano in izdelano sedemjedrno optično vlakno [8]. Pri izdelavi je bila uporabljena metoda priprave surovca in vlečenja vlakna (angl. stack-and-draw), ki poteka v dveh korakih. V prvem delu se v stekleno cev zložijo enorodovni surovci, ki so predhodno raztegnjeni na ustrezen premer. V vmesni prostor med surovce se zataknejo tanjše steklene palice, ki so izdelane iz stekla z lomnim količnikom obloge. Ko so zapolnjeni vsi večji prostori med surovci s tanjšimi steklenimi palicami, se preide na drugi korak, ki je vlečenje optičnega vlakna. Iz zasnovane strukture se izsesa zrak in jo montira v vlečni stolp. S pravilno izbrano temperaturo peči v stolpu in hitrostjo navijanja vlakna na dnu stolpa se poskrbi za zahtevan zunanji premer 125 mikrometrov. Ker so bile dimenzije začetnih steklenih palic pravilno izbrane, nastanejo jedra večjedrnega optičnega vlakna želenih dimenzij in se prav tako nahajajo na pravilni medsebojni razdalji. Za evalvacijo in ujemanje izdelanega z načrtovanim večjedrnim optičnim vlaknom je bil opravljen test homogenosti, ki je pokazal ujemanje med zasnovanim in izdelanim sedemjedrnim vlaknom.

3 MERITVE PRENOSNE KARAKTERISTIKE SONDE IZ VEČJEDRNEGA OPTIČNEGA VLAKNA

Simulacijski rezultati so podkrepiljeni s praktičnimi meritvami na predhodno zasnovanem in izdelanem sedemjedrnem optičnem vlaknu. Vlakenska struktura je načrtovana za meritve v območju infrardeče svetlobe,

kjer je mogoče izvesti meritve lastnosti z lahko dobavljivimi svetlobnimi izvori in detektorji, uporabljenimi v telekomunikacijski opremi. Izvedene so meritve z različnimi tipi svetlobnih izvorov in optičnim spektralnim analizatorjem. Za svetlobni izvor se lahko uporablja širokospektralni izvor bele nepolarizirane svetlobe ali polariziran laserski izvor z nastavljivo resonančno votlino ali vlakenski ojačevalnik s primesmi erbijskega, ki oddaja nepolarizirano svetlobo v območju od 1510 do 1580 nm.

Za verifikacijo simulacijskega modela je bila praktično izdelana valovodna struktura, ki jo prikazuje slika 2. Identični enorodovni, enojedrni optični vlakni sta v vzdolžni osi zvarjeni na konca kratkega sedemjadrnega optičnega vlakna, s čimer dobimo valovodno strukturo, sestavljeno iz treh odsekov. Triodsečna valovodna struktura je sestavljena iz enorodovnega vlakna, ki je spojeno na večjedrno vlakno, to pa naprej na drugo enorodovno vlakno (angl. single-mode fiber – multi-core fiber – single-mode fiber – SMS). Uporabljeno sedemjedrno optično vlakno ima enorodovna jedra identičnih dimenzij.



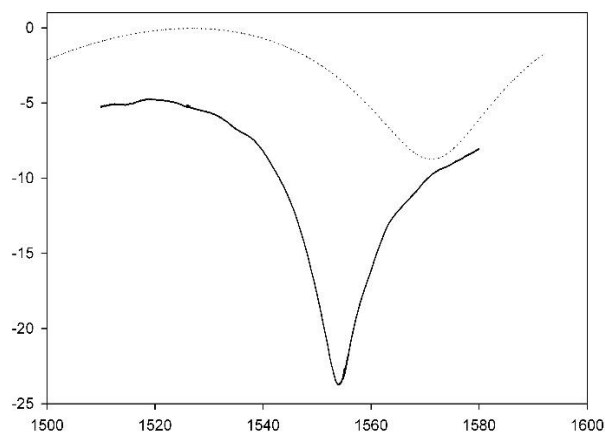
Slika 2: Struktura SMS (angl. single-mode fiber – multi-core fiber – single-mode fiber)

Svetloba v centralnem jedru večjedrnega optičnega vlakna je vzbujena z osnovnim rodnom, ki izhaja iz enorodovnega, enojedrnega optičnega vlakna. Po prepotovanju določene dolžine se svetloba iz centralnega jedra prenese na preostala jedra. Valovodna struktura večjedrnega optičnega vlakna začne oscilirati med stanji, ko je vsa svetloba v centralnem jedru, do stanja, ko je svetloba enakomerno porazdeljena med vseh sedem jeder. Opaziti je, da je prenos moči po sedemjedrnem optičnem vlaknu zelo odvisen od valovne dolžine svetlobe in dolžine sedemjedrnega optičnega vlakna, ker se moč porazdeli na različne rodove, ki med potovanjem po vlakenski strukturi interferirajo. Moč, ki se sklapija in prenaša po drugem enorodovnem, enojedrnem optičnem vlaknu, je odvisna od porazdelitve svetlobe med jedri sedemjedrnega optičnega vlakna. Interferenčna prenosna karakteristika ima periodičen odziv glede na valovno dolžino prenesene svetlobe.

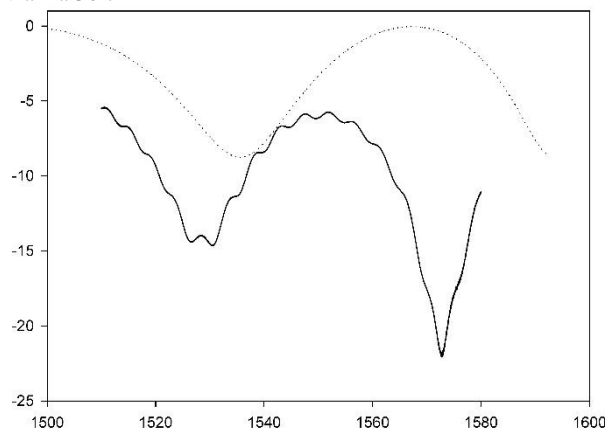
Lastnost strukture SMS je odvisna od valovne dolžine svetlobe in dolžine sedemjedrnega vlakna. V prenosni karakteristiki strukture SMS je opaziti periodično modulacijo moči v odvisnosti od valovne dolžine. Perioda interferenčnega vzorca je najbolj odvisna od dolžine sedemjedrnega odseka, medtem ko je modulacijska globina najbolj odvisna od geometrije večjedrne strukture. Ta modulacija se s pridom lahko uporabi za izvedbo vlakenskega optičnega filtra. Iz

opravljenih simulacij je razvidno, da se sklopna dolžina in s tem tudi centralna valovna dolžina filtra lahko izbira z dolžino sedemjedrnega vlakna. Prav tako se iz opravljenih simulacij lahko razbere, da razmik med jedri in velikost jedra vplivata na prenosno karakteristiko.

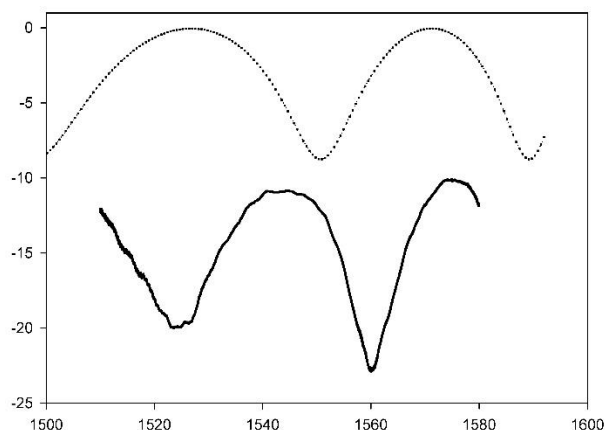
Za SMS-strukture dolžin 30, 40, 60 in 80 cm so bile narejene laboratorijske meritve prenosne karakteristike v odvisnosti od valovne dolžine. Na slikah 3, 4, 5 in 6 je prikazano ujemanje prenosne karakteristike, pridobljene s simulacijami z izmerjeno prenosno karakteristiko.



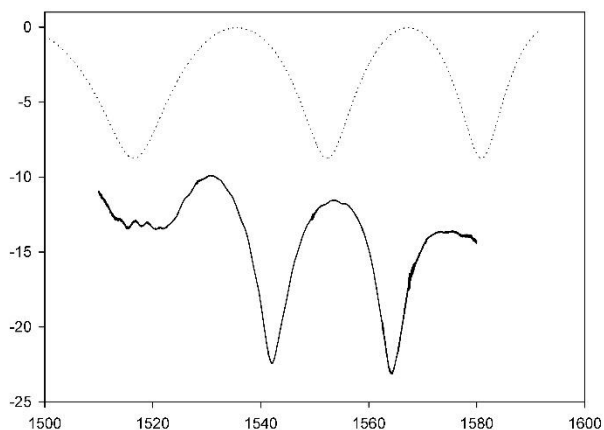
Slika 3: Prenosna karakteristika strukture SMS za dolžino vlakna 30 cm



Slika 4: Prenosna karakteristika strukture SMS za dolžino vlakna 40 cm



Slika 5: Prenosna karakteristika strukture SMS za dolžino vlakna 60 cm



Slika 6: Prenosna karakteristika strukture SMS za dolžino vlakna 80 cm

Perioda in globina modulacije se pri simulacijah in meritvah povsem ujemata. Frekvenčni premik, ki ga je opaziti v prenosni karakteristiki, pripisujemo na nekaj centimetrov natančni izvedbi strukture SMS.

Izsledki meritev v infrardečem območju se ujemajo z rezultati numeričnih simulacij, kar potrjuje, da so razviti postopki načrtovanja, optimizacije in izdelave optičnega vlakna primerni za preslikavo v območje valovnih dolžin, ki jih narekujejo biokemijski materiali.

4 SKLEP

Rezultati numeričnih simulacij s tridimenzionalnim popolnoma vektorskim modelom prikazujejo načrtovanje in optimizacijo porazdelitve moči v močno sklopljenih jedrih sedemjedrnega optičnega vlakna. Pri zasnovi so se spreminjali lomni količnik obloge in jedra, premer jedra, razdalja med jedri in dolžina fluorimetrične sonde iz večjadrnega optičnega vlakna. Pri tem selektivnost valovne dolžine omogoča, da bo svetloba, usmerjena v osrednje jedro, prehajala skozenj in dosegla konec sonde, medtem ko se svetloba preostalih valovnih dolžin sklopi in pojavi na koncu preostalih zunanjih šestih obodnih jeder.

Na novo zasnovana sonda iz večjadrnega optičnega vlakna ima večjo učinkovitost kot konkurenčne večvlakenske sonde, saj ima relativno manjše razdalje med svetlovodi, kar omogoča boljše geometrijsko prekrivanje območja svetlobnega vzbujanja in zaznavanja. Glede na tehnološke trende je pričakovati, da bo integracija večjega števila svetlovodov v eni optični strukturi lahko bistveno znižala ceno izdelave optičnih sond, podobno kot je pripomogla na področju elektronskih in optičnih elementov. Poleg tega integracija več optičnih svetlovodov v enotnem večjadrnem vlaknu omogoča učinkovite merilne lastnosti na podlagi pojava selektivne filtracije s pomočjo presluhov med jedri večjadrnega optičnega vlakna.

Odperto je novo področje v snovanju fluorimetričnih sond. S pomočjo pridobljenega znanja in razvitih postopkov načrtovanja je naprej mogoče načrtovati in izdelati večjadrno optično vlakno za namensko aplikacijo fluorimetrične sonde in njeno testiranje na

realnih biokemijskih vzorcih. Nadaljnje delo bo potekalo tudi v smeri zasnove heterogene optične vlakenske sonde in analize presluha pri ukrivljenem večjadrnem optičnem vlaknu.

LITERATURA

- [1] Ahmed Samir, Boštjan Batagelj. An Overview of Fiber Fluorimeter Probes. bo objavljeno v IPSI BgD Transactions on Advanced Research, 2017.
- [2] Miran Bürmen. Vpliv zmanjšanja simulacijskega volumna na napako in hitrost izračunov reflektance z metodo Monte Carlo. Elektrotehniški vestnik, letn. 84, št. 1–2, str. 61–65, 2017.
- [3] Ahmed Samir, Boštjan Batagelj. A multicore fibre probe for fluorescence spectroscopy. Conference proceedings 2016, 52nd International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Biosensors and Microfluidics, September 28–30 2016, Ankaran, Slovenia. Ljubljana: MIDEM - Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials, 2016, str. 106–109, 2016.
- [4] Jure Sušin, Vesna Eržen, Maja Atanasovska, Jan Fišer, Blaž Lavrič, Aljaž Hrastar, Manca Gale, Aljaž Bešter Cerar, Katarina Čebela, Luka Perpar, Leon Kocjančič, Ahmed Samir, Luka Bogataj, Jurij Tratnik, Matej Švigelj, Boštjan Batagelj. Prostorsko multipleksiranje v vlakenskih optičnih komunikacijah. Elektrotehniški vestnik, letn. 82, št. 4, str. 217–223, 2015.
- [5] Ahmed Samir, Boštjan Batagelj. Seven-core optical fiber design and fabrication for space-division multiplexing optimized for low crosstalk. ICTON 2016, 18th International Conference on Transparent Optical Networks, 10–14 July 2016, Trento, Italy. str. 1–4, 2016.
- [6] Manca Gale, Leon Kocjančič, Ahmed Samir, Boštjan Batagelj. Simulacije presluha v večjadrnem optičnem vlaknu. Zbornik štiriindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2015, 21.–23. september 2015, Portorož, Slovenija, IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, zv. A, str. 45–48, 2015.
- [7] Ahmed Samir, Boštjan Batagelj. Simulations of inter-core crosstalk in a seven-core optical fiber based on silica glass. Zbornik petindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2016, 19.–21. september 2016, Portorož, Slovenija, IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, zv. A, str. 49–52, 2016.
- [8] Ahmed Samir, Luka Perpar, Boštjan Batagelj. Fabrication of a single-mode seven-core optical fiber using the stack-and-draw procedure. FOAN 2016, 6th International Workshop on Fiber Optics in Access Network, October 18–20 2016, Lisbon, Portugal, 2016, str. 39–42, 2016.

Ahmed Samir je diplomiral leta 2006 na fakulteti za znanost Ain Shamsove univerze v Kairu. Nato se je kot asistent zaposlil na isti fakulteti na oddelku za fiziko. Leta 2012 je magistriral na Ain Shamsovi univerzi v Kairu z naslovom naloge Uporaba laserske interferometrije peg za proučevanje nanodelcev. Leta 2013 se je pridružil Laboratoriju za sevanje in optiko na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je leta 2017 dokončal doktorski študij. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo prenos optičnih signalov in zaznavne optične tehnologije s pomočjo večjadrnih optičnih vlaken.

Boštjan Batagelj je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer predava predmete Satelitske komunikacije in navigacije, Optične komunikacije in Radijske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, osmih patentnih prijav ter sodeluje pri domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih s področja radijskih in optičnih tehnologij.