

SIMULACIJE EFEKTA SAVIJANJA KOD PLASTIČNIH OPTIČKIH VLAKANA

SIMULATION OF EFFECT OF PLASTIC OPTICAL FIBERS BENDING

Miloš Slankamenac, Milan Vranić, Nikola Stojanović, Miloš Živanov, Miodrag Jelić, Jovan Bajić, Dragan Stupar,
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Republika Srbija

Sadržaj - Predmet ovog rada su simulacije plastičnih optičkih vlakana različitih geometrijskih struktura u OptiBPM softverskom alatu. Akcenat je dat na izračunavanju gubitaka optičke snage tokom prenosa kroz plastično optičko vlakno u zavisnosti od prečnika zakrivljenosti vlakna. Rezultati simulacija su upoređeni sa prethodno dobijenim eksperimentalnim rezultatima. Razmotrena je i primena plastičnih optičkih vlakana kao hemijskih senzora u zaštiti životne sredine.

Abstract - This paper describes the simulation of plastic optical fibers of different geometric structures in OptiBPM software tool. The calculation of optical power loss during transmission through plastic optical fiber, depending on the diameter of curvature of the fiber is emphases. Simulation results are compared with previously obtained experimental results. The use of plastic optical fibers as chemical sensors in environmental protection is discussed.

1. UVOD

U poslednjih nekoliko godina došlo je do naglog razvoja optičkih hemijskih senzora. Primena ovih senzora je veoma bitna danas, jer je njihova uloga pri otkrivanju hemijskih parametara u industrijskim i hemijskim procesima, kao i u biomedicinskim oblastima i zaštiti životne sredine veoma važna. Savremeni optički senzori nude značajnu prednost u odnosu na tradicionalne senzore [1-3].

Prilikom primene ovih senzora, važno je znati kako se optička vlakna ponašaju u različitim sredinama. Na osnovu promene indeksa prelamanja optičkih vlakna, može se detektovati prisustvo nekih supstanci u tečnostima koje se ispituju.

2. TEORIJSKA ANALIZA

U slobodnom prostoru elektromagnetski talasi putuju brzinom od $3 \cdot 10^8$ m/s. U čvrstom materijalu, ova brzina se razlikuje i zavisi od materijala i geometrije vodeće strukture. Talasna dužina svetlosnog snopa je data kao:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

gde je v brzina snopa, a f njegova učestanost. Učestanost određuje izvor svetlosti i ona se ne menja kada svetlost prelazi iz jednog materijala u drugi. Umesto toga, razlika u brzini prostiranja u dve sredine izazvaće promenu talasne dužine u skladu sa jednačinom (1).

Pri prolasku kroz različite materijale svetlosni zrak se prostire različitim brzinama. Odnos brzina prostiranja svetlosnog zračenja kroz vakuum i kroz neku drugu sredinu se naziva indeks prelamanja (index of refraction) te sredine, i za njega važi:

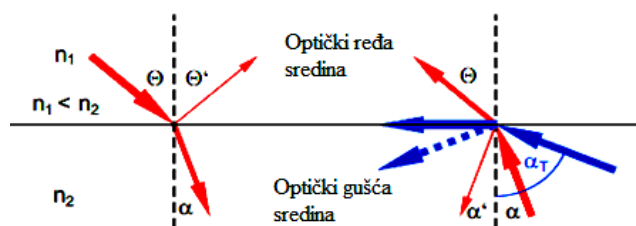
$$n = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

gde je c – brzina svetlosti u vakuumu.

2.1. Prelamanje i totalna refleksija

Na razdvojnoj površini sredina različitih indeksa prelamanja javljaju se prelamanje (refrakcija) i odbijanje (refleksija) (slika 1.). Deo svetlosnog zračenja koji pada pod uglom Θ u odnosu na normalu na razdvojnu površ prelomiće se pod uglom α i nastavi da putuje kroz drugu sredinu. Takođe deo svetlosnog zračenja će se reflektovati od razdvojne površi pod uglom Θ' u odnosu na normalu. Važe sledeće relacije:

$$\frac{\sin \Theta}{\sin \alpha} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \Theta = \Theta'. \quad (3)$$



Slika 1. Prelamanje i odbijanje svetlosnog zračenja na graničnoj površini dve sredine različitih indeksa prelamanja

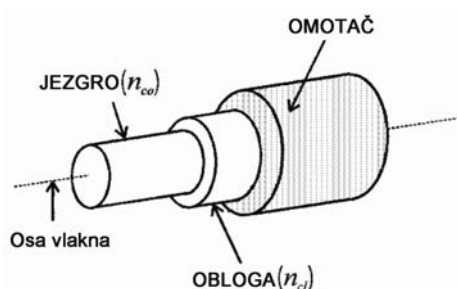
Prolaskom svetlosnog zračenja iz sredine većeg indeksa prelamanja (optički gušće sredine) u sredinu manjeg indeksa prelamanja (optički ređu sredinu) imamo da sa porastom upadnog ugla α raste i prelomljeni ugao Θ svetlosnog zračenja. Pošto je ugao Θ uvek veći od ugla α , ugao Θ će pre dostići 90° od ugla α . Kritičan upadni ugao $\alpha = \alpha_T$ je onaj koji dovodi do prelamanja svetlosnog zračenja pod uglom od 90° . Ako je upadni ugao α veći od kritičnog ugla α_T , svetlosni zrak će se odbiti od razdvojne površine i ostaće u materijalu iz kojeg nailazi. Ovaj princip potpune refleksije omogućuje optičkim vlaknima da provode svetlosni snop. Kritičan ugao $\alpha = \alpha_T$ za granični slučaj $\Theta = 90^\circ$ je:

$$\sin \alpha_T = \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

2.2. Plastična vlakna

Plastična optička vlakna služe kao dopuna za staklena vlakna u komunikaciji veze kratkog dometa, jer su jednostavna za rukovanje, fleksibilna i ekonomična, iako se ne koriste za velike domete zbog relativno visokog slabljenja [4].

POF (Plastic optical fiber) korišćena za optičku komunikaciju su veoma fleksibilni talasi koji se sastoje od skoro transparentnih dielektričnih materijala. Presek tih vlakana je kružni i običan, deljiv u tri sloja, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Struktura POF [4]

Tri sloja su nazvana jezgro, obloga i omotač, zaštitni sloj. Unutar jezgra, indeks prelamanja može biti homogen (step index vlakna, SI) ili kalibrisan (graded index vlakna, GI). Poluprečnik jezgra je obično između 125 i 490 μm . Većina svetlosti se prenosi duž jezgra, što se postiže okruživanjem jezgra sa oblogom nižeg indeksa prelamanja. Tipične vrednosti za jezgra i obloge indeksa prelamanja za step-index PMMA (Polymethyl methacrylate) POF su redom, $n_{co}=1.492$ i $n_{cl}=1.417$.

3. OptiBPM SOFTVERSKI ALAT

Softver koji se koristi za simulacije optičkih vlakana je OptiBPM. OptiBPM je sveobuhvatan programski alat koji služi za modelovanje kompleksnih optičkih talasovoda čija je svrha provođenje, spajanje, razdvajanje, prekidanje, multipleksiranje i demultipleksiranje signala u optičkim uređajima [5]. Neke od njegovih najznačajnijih karakteristika su:

- Zasnovan je na metodi propagacije talasa (Beam Propagation Method – BPM) što mu omogućava simulaciju prostiranja svetlosti kroz bilo koju vrstu talasovoda.
- Sadrži mnoštvo funkcija među kojima je i mogućnost definisanja i upotrebe anizotropnih materijala u projektovanju talasovoda kao i u simulacijama.
- Omogućava projektovanje talasovoda integrisanih u substratu, uključujući ravne, izbočene, udubljene i ukopane talasovode kao i talasovode nastale difuznim procesom.
- Olakšava projektovanje splitera, kaplera, kombinatora (usklađivača), modulatora, demodulatora a takođe i uređaja baziranih na optičkim vlaknima.

Integrisano okruženje softvera omogućuje kombinovanje više vrsta talasovoda na istoj površini (optičkih vlakana, kanalnih i difuznih talasovoda). Jednostavan meni (menu) olakšava snalaženje u softveru i lagan izbor 2D ili 3D simulacija. Takođe, početnu tačku simulacije je moguće proizvoljno izabrati korišćenjem opcije za podešavanje

ulazne ravni. OptiBPM sadrži mogućnost analize tolerancije i optimizacije na osnovu prikupljenih informacija u toku simulacije koji se upotrebom alata za kodiranje mogu modifikovati kako bi se zadovoljile potrebe kritične za dizajn. Postoji i mogućnost korišćenja Monte Karlo simulacije kako bi se korisniku omogućila upotreba statističke analize u predviđanju načina prostiranja svetlosti.

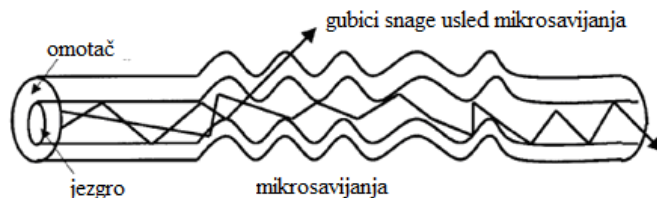
Ovim softverom je moguće projektovati talasovode raznih geometrijskih oblika kao što su pravougaoni, kružni, eliptični, prstenasti, parabolični, konusni itd. Svi projektovani talasovodi (bez obzira na geometrijski oblik) su potpuno parametrizovani tako da je poziciju talasovoda kao i njegove sve ostale karakteristike moguće kontrolisati upotrebom jednostavnih matematičkih izraza. Takođe, ne postoji ni ograničenje u pravcu prostiranja talasovoda pa je moguće njegovo postavljanje pod bilo kojim uglom.

Osim pomenutih osnovnih geometrijskih oblika, za projektovanje talasovoda je omogućena i upotreba proizvoljnih oblika koji mogu biti dizajnirani bilo definisanjem svih linija oblika, bilo definisanjem ključnih tačaka. U suštini, moguće je definisati bilo koji oblik talasovoda čije se prostorne koordinate mogu izraziti kao funkcija jedne promenljive. Moguće je projektovati i trodimenzionalne talasovode i tada je njihova dužina i širina definisana u x - z ravni a visina u y ravni. Postoji i opcija definisanja bočnog suženja i suženja po debljini, koje može biti linearno ili proporcionalno, kao i upotrebe nesimetričnih struktura.

4. SIMULACIJE PLASTIČNIH OPTIČKIH VLAKANA

4.1. Gubici snage u optičkom vlaknu u zavisnosti od prečnika zakrivljenosti vlakna

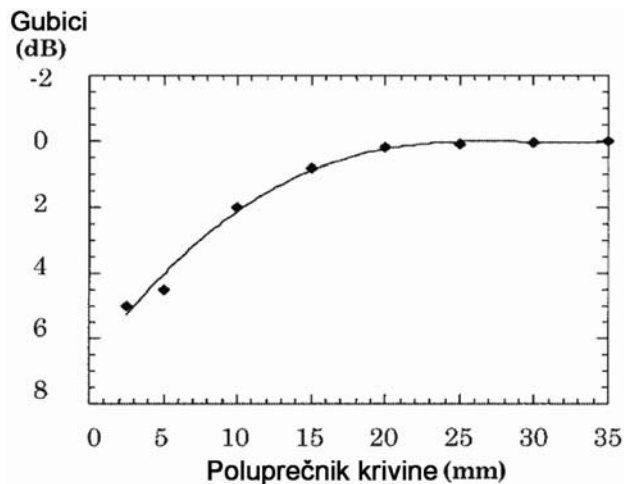
Prilikom savijanja optičkog vlakna dolazi do pojave porasta slabljenja, što je posledica gubitaka pri zračenju. Kod vlakna razlikujemo dva tipa krivina. Kada govorimo o krivinama osetnih dimenzija, nazivamo ih makrokrivine. Nasuprot tome, kada se krivine odnose na sitne oscilacije u osi vlakna (na red prečnika vlakna, kao na slici 3.), zovu se mikrokrivine [1]. Ovo se javlja zbog nedostatka u proizvodnji vlakna ili zbog neravnomernog lateralnog pritiska generisanog tokom procesa kabliranja. Gubici koji potiču od oba tipa krivina mogu se koristiti za projektovanje osnovnih POF senzora.



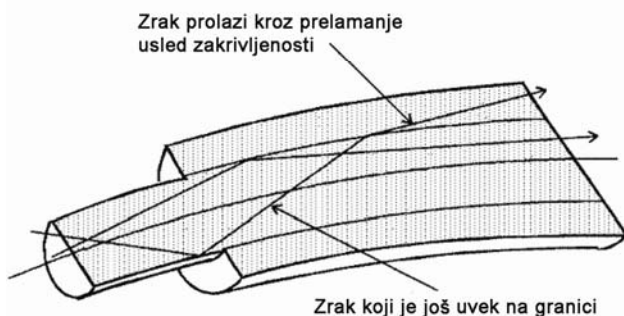
Slika 3. Gubici POF usled mikroneravnina

Makrokrivine su uglavnom proizvedene tokom instalacionog procesa POF. Kada je krivina mala, gubici su praktično zanemarljivi. Kako radijus krivine opada gubici usled zračenja rastu. Gubici su veći za GIPOF (graded-index polymer optical fiber) nego za SIPOF (step-index polymer optical fiber) za isti prečnik. Na primer, ukupni gubici zračenja usled punog zaokreta u standardnim PMMA SIPOF od prečnika 1 mm su prikazani na slici (4a) za različite krivine radijusa. Snaga raspada pri smanjenju radijusa krivine

je eksponencijalna, sa eksponentom koji zavisi od parametara kao što su v_c , R , a , n_{co} i λ . Mehanizam kojim ovi gubici nastaju je prikazan na slici (4b). Krajnji efekat savijanja optičkog vlakna jeste smanjenje intenziteta svetlosti koje propagira kroz vlakno.



(a)



(b)

Slika 4. Gubici usled zračenja u SIPOF prouzrokovani makroneravninama

4.2. Simulacije

Prilikom simulacija korišćeno je optičko vlakno čiji je indeks prelamanja jezgra $n=1.492$, i radijusi vlakana su menjani od 2 mm pa do 9 mm, pri čemu za oblogu vlakna su korišćeni indeksi prelamanja iz tabele 1.

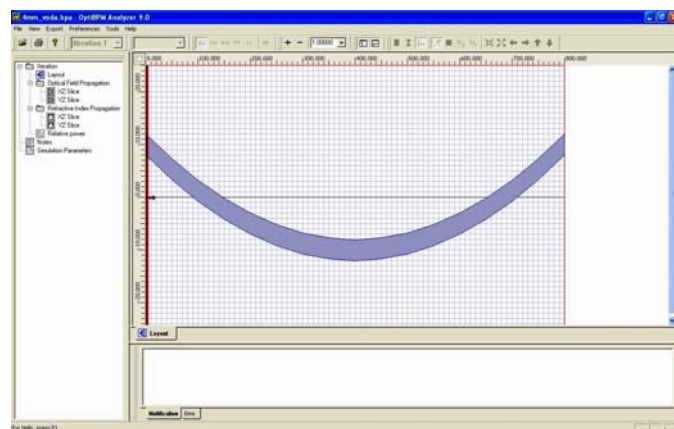
Vlakno koje se ispituje, prvo mora da se konstruiše u odgovarajućem softveru, OptiBPM. Kada se to uradi, dobija se izgled vlakna prikazan na slici 5.

Zatim se podešavaju parametri simulacije i pokreće se simulacija. Nakon završetka simulacije prikazuje se optičko polje propagacije, propagacija indeksa prelamanja i relativna snaga.

Tabela 1. Indeksi prelamanja za rastvore korišćene prilikom izvođenja simulacija [6]

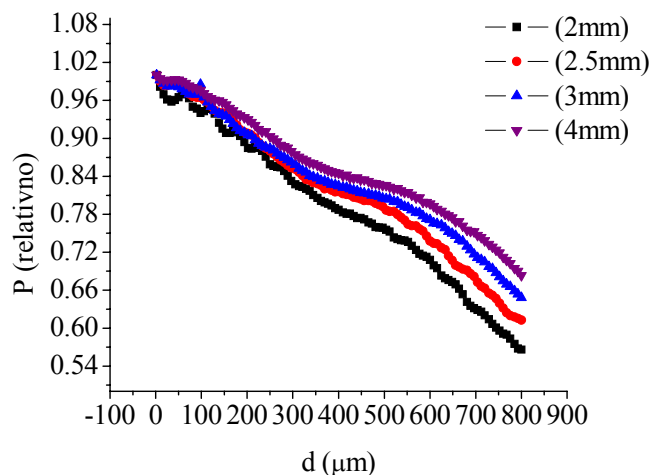
Tečnost	Indeks prelamanja
voda (100 %)	1.33
voda (75 %) +glicerin (25 %)	1.36404
voda (50 %) +glicerin (50 %)	1.39809
voda (25 %) +glicerin (75 %)	1.43532
glicerin (100 %)	1.47399

Vlakno koje se ispituje, prvo mora da se konstruiše u odgovarajućem softveru, OptiBPM. Kada se to uradi, dobija se izgled vlakna prikazan na slici 5. Zatim se podešavaju parametri simulacije i pokreće se simulacija. Nakon završetka simulacije prikazuje se optičko polje propagacije, propagacija indeksa prelamanja i relativna snaga.



Slika 5. Lejaut izgleda optičkog vlakna radijusa 4 mm

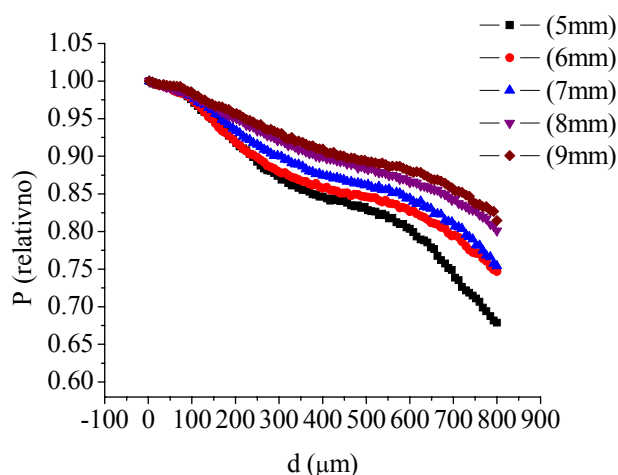
Kada su završene planirane simulacije, za sve vrste radijusa vlakana i za sve tipove indeksa prelamanja, koji su simulirani kao obloga talasovoda, treba napraviti odgovarajući prikaz rezultata. Dobijeni brojni rezultati su obrađeni u softveru OriginPro, koji se koristi da bi se dobili simulirani rezultati u grafičkom obliku, sl. 6 i 7.



Slika 6. Zavisnost snage prostiranja svetlosti od dužine optičkog vlakna i radijusa zakrivljenosti u rastvoru 100% vode, za radijuse zakrivljenosti od 2 do 4 mm

Slike 6 i 7 predstavljaju zavisnosti relativne snage u odnosu na promenu zakrivljenosti radijusa vlakna u 100%-tnom rastvoru vode. Pimećujemo kod sl. 6. pad snage sa 1 na 0.58, pri čemu je najveći pad snage kod vlakna sa najmanjim radijusom, tj. 2 mm, dok je najmanji pad snage kod vlakna sa radijusom od 4 mm.

Kod sl. 7. pad snage je manji, tj. kreće se od 1 pa do 0.67, pri čemu je takođe najveći pad snage za najmanji korišćen radijus od 5 mm, a najmanji pad snage za radijus od 9 mm. Takođe možemo primetiti, da je kod sl. 7. pad snage u nekim delovima približno linearan, dok je kod sl. 6. pad snage u nekim delovima uglavnom skokovit.



Slika 7. Zavisnost snage prostiranja svetlosti od dužine optičkog vlakna i radijusa zakrivljenosti u rastvoru 100% vode, za radijuse zakrivljenosti od 5 do 9 mm

Na osnovu dobijenih rezultata, možemo da zaključimo, da se relativna snaga menja sa promenom radijusa vlakna, tako što se sa povećanjem radijusa vlakna, pad snage smanjuje. Povećanjem radijusa vlakna, vlakno se ispravlja i time su gubici usled zakrivljenosti manji. Ako posmatramo pad snage za različite parametre simulacija, možemo da zaključimo da je pad snage najveći kod vazduha, a najmanji kod 100%-tnog rastvora glicerina.

Prilikom upoređivanja dobijenih rezultata sa eksperimentalnim rezultatima koji su prezentovani u radu [6], dolazimo do istih zaključaka, tj. da je pad snage najveći kod vode, a najmanji kod 100%-tnog rastvora glicerina.

5. OPTIČKA VLAKNA KAO HEMIJSKI SENZORI

U poslednjih nekoliko godina došlo je do znatnog razvoja optičkih hemijskih senzora. Prvi optički senzor na bazi optičkog vlakna, je senzor za detekciju amonijaka opisan 1976 [7]. Od tada, vršena su istraživanja brojnih parametara. Ova interesovanja su potpuno opravdana, jer je otkrivanje hemijskih parametara izuzetno važno u mnogim industrijskim i hemijskim procesima, u kontroli životne sredine i u biomedicinskim oblastima. Zato optički hemijski senzori nude značajnu prednost u odnosu na tradicionalne senzore.

U industriji mogućnost usavršavanja daljinske detekcije merenja u zagađenim životnim sredinama i ostvarivanja kontinualnog praćenja parametara koji se posmatraju je veoma bitno.

U ekološkim analizama, mogućnost obavljanja "in-situ" kontrole bez obaveze da se pribegava uzorkovanju ispitivanog materijala je od velikog značaja i često je najvažnija prednost optičkih senzora na bazi optičkih vlakana. U biomedicinskom polju ta detekcija hemijskih parametara pomoću optičkih vlakana dostigla je verovatno najveći razvoj [1].

Njihov visok stepen minijaturizacije, jednostavna geometrijska promenljivost, i mogućnost kontinualnog praćenja brojnih parametara glavne su prednosti u odnosu na ostale tipove senzora. Pomoću ovih senzora mogu se obaviti invazivne analize brojnih parametara prisutnih u krvi (merenje pH, parcijalnog pritiska kiseonika, parcijalnog pritiska ugljen-dioksida, kalcijuma, kalijuma, glukoze i sl.), kao i invazivna merenja i analize enzima i antitela.

Prilikom primene ovih senzora, važno je znati kako se optička vlakna ponašaju u različitim sredinama. Zbog toga je prilikom simulacija koje su rađene, menjana zakrivljenost vlakna i indeks prelamanja obloge, da bi se videlo kako se vlakna ponašaju sa njihovom promenom, tj. da bi su izračunali gubici u vlaknu. Na osnovu promene indeksa prelamanja, može se detektovati prisustvo nekih neželjenih supstanci u tečnostima koje se ispituju.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazane simulacije optičkih vlakana različitih geometrijskih oblika pri promeni indeksa prelamanja sredine u koju se postavlja vlakno, i pri promeni zakrivljenosti vlakna. Na osnovu tih promena u praktičnim primenama mogu se detektovati različite supstance u tečnostima koje se ispituju. To pokazuje da sa promenom geometrije plastičnih vlakna, ona mogu da nađu primenu kod mnogih senzora u zaštiti životne sredine.

6. ZAHVALNOST

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru projekata „Razvoj metoda, senzora i sistema za praćenje kvaliteta vode, vazduha i zemljišta” pod brojem III43008 i „Optoelektronski nanodimenzioni sistemi – put ka primeni” III45003.

7. LITERATURA

- [1] Thompson, B.J., ed. Fiber Optic Sensors. Second Edition ed., ed. P.B.R. Shizhuo Yin, Francis T. S. Yu. 2008.
- [2] Kwang Taek Kima, N.I.M., Hyun-Kyoung Kim, A fiber-optic UV sensor based on a side-polished single mode fiber covered with azobenzene dye-doped polycarbonate. Sensors and Actuators A: Physical, 2010.
- [3] P. Natha, H.K.S., P. Datta, K.C. Sarma, All-fiber optic sensor for measurement of liquid refractive index. Sensors and Actuators A: Physical, 2008.
- [4] J. Zubia and J. Arrue, "Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications", Bilbao, 2006.
- [5] www.optiwave.com/products/bpm_overview.html
- [6] D. Stupar, M. Slankamenac, N. Stojanović, J. Bajić, M. Živanov: "Fiber optički senzor za merenje indeksa prelamanja tečnosti", INDEL 2010.
- [7] Sergio Martellucci, Arthur N. Chester, Anna Grazia Mignani, "Optical Sensors and Microsystems", New York, Boston, London, 2002.