

Softversko projektovanje optičkih vlakana

Radoslav Radovanović, Nikola Stojanović, Miloš Slankamenac, *Member, IEEE*, Miloš Živanov, *Senior Member, IEEE*

Sadržaj — U radu je opisano projektovanje monomodnog optičkog vlakna u *OptiFiber* softverskom alatu, i predstavljeno je upoređivanje dobijenih rezultata sa tipičnim vrednostima optičkog vlakna. Takođe u radu je data još i karakterizacija realnog optičkog vlakna, čiji profil je snimljen laboratoriskim uređajem, optičkim analajzerom EXFO NR-9200, a zatim taj rezultat ubačen u *OptiFiber*, gde je odrađeno projektovanje realnog vlakna.

Ključne reči — optička vlakna, projektovanje, *OptiFiber*, optoelektronika.

I. UVOD

OPTIČKA vlakna su danas u velikoj meri zastupljena u telefoniji, kablovskoj televiziji i internetu. Glavna prednost korišćenja optičkih vlakana je veća razdaljina do koje može da se prenese signal i veći propusni opseg. Izbor odgovarajućeg optičkog vlakna je vrlo važan za dati optički sistem. Parametri se mogu eksperimentalno meriti na postojećem uzorku vlakna, kako bi se proizvodni proces vlakna prilagodio optimizovanoj proizvodnji. Međutim, ovaj pristup pronalaženja najboljeg rešenja za optimizaciju vlakna je vrlo spor, skup i nepouzdan. Zbog toga se ovi poslovi sada sve više obavljaju korišćenjem softverskih alata za projektovanje i modelovanje optičkih vlakana. U ovom radu projektovanje optičkih vlakana rađeno je pomoću softverskog alata *OptiFiber*. Predstavljeno je projektovanje monomodnog optičkog vlakna uz opis svih mogućnosti koje ovaj softverski alat može da pruži, kao i opis svih parametara koji utiču na osobine vlakna. Jedna od opcija softverskog alata *OptiFiber* je mogućnost karakterizacije realnog optičkog vlakna. To se postiže tako što se profil realnog optičkog vlakna snimi optičkim analajzerom (npr. EXFO NR-9200), a zatim se snimljeni rezultat ubaci u *OptiFiber* gde se vrši projektovanje realnog optičkog vlakna.

II. STRUKTURA I PROSTIRANJE SVETLOSTI KROZ OPTIČKO VLAKNO

Optičko vlakno po konstrukciji predstavlja cilindrični dielektrični talasovod koji prenosi svetlost duž svoje ose procesom totalne unutrašnje refleksije. Vlakno se sastoji od jezgra i omotača koji su napravljeni od dielektričnog materijala. Dimenzije jezgra i razlike indeksa prelamanja

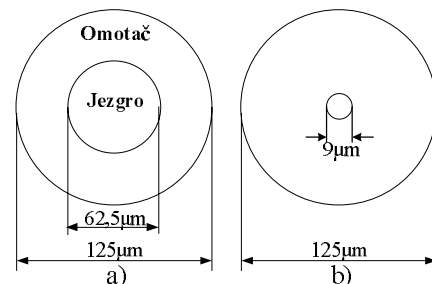
R. Radovanović, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija (telefon: 381-21-4852540; e-mail: cvijo84@gmail.com).

N. Stojanović, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija (telefon: 381-21-4852540; e-mail: stojanovic_nikola_ns@yahoo.com).

M. Slankamenac (autor za kontakte), Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija (telefon: 381-21-4852540; e-mail: miloss@uns.ac.rs).

M. Živanov, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija (telefon: 381-21-4852541; e-mail: zivanov@uns.ac.rs).

jezgra i omotača, određuju da li se u vlaknu može prostirati samo jedan mod, ili se mogu prostirati osnovni i viši modovi. Prema tome, vlakna mogu biti monomodna i multimodna. Poprečni presek ove dve vrste vlakana predstavljen je na sl. 1. Pored dva osnovna sloja, jezgra i omotača, optičko vlakno ima i zaštitni sloj, koji štiti vlakno od mehaničkih oštećenja [1].



Sl 1. Poprečni presek: a) multimodnog i b) monomodnog optičkog vlakna.

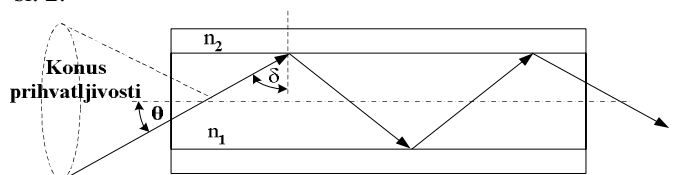
Prostiranje svetlosnog zraka kroz jezgro optičkog vlakna bazira se na pojavi totalne refleksije koja se, pod određenim uslovima, javlja na razdelnoj površini dveju sredina [2]. Jedan od uslova je da sredina iz koje nailazi svetlost ima veći indeks prelamanja, a drugi da upadni ugao zraka na razdelnu površinu sredina, bude veći od kritičnog ugla δ , određenog relacijom:

$$n_1 \sin \delta = n_2 \sin \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

gde su n_1 i n_2 indeksi prelamanja jezgra i omotača. Samo svetlosni zraci koji dopiru do optičkog vlakna pod određenim opsegom uglova mogu da putuju duž ose vlakna bez rasipanja. Ovaj opseg uglova se zove konus prihvatljivosti optičkog vlakna. Na osnovu relacije (1) lako se pokazuje da svi zraci koji ulaze u jezgro pod uglovima manjim od:

$$\theta = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2)$$

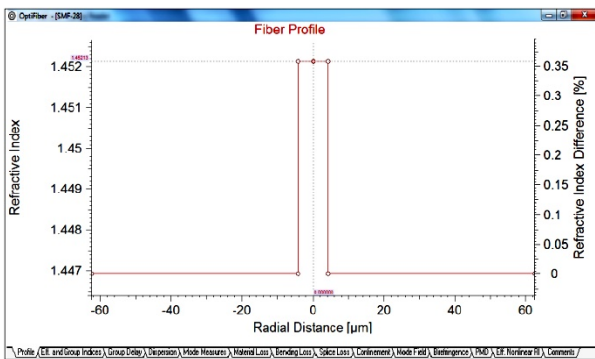
nastavljaju da se prostiru kroz jezgro, zato ugao θ predstavlja karakteristični ugao optičkog vlakna. Prostiranje svetlosnog zraka kroz optičko vlakno sa obeleženim odgovarajućim uglovima može se videti na sl. 2.



Sl. 2. Prostiranje svetlosnog zraka kroz optičko vlakno.

III. PROJEKTOVANJE MONOMODNOG OPTIČKOG VLAKNA

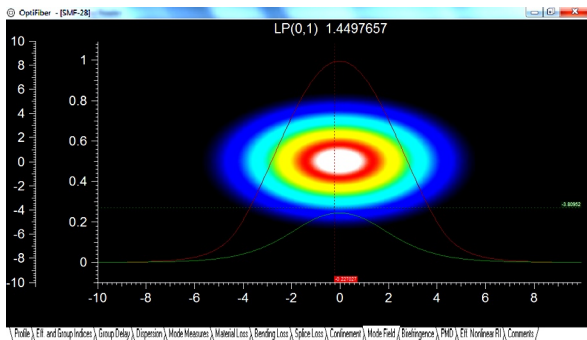
Projektovanje monomodnog optičkog vlakna radi se u softverskom alatu *OptiFiber*. Proces projektovanja optičkog vlakna započinje definisanjem njegovog profila, koji može da se definiše u odnosu na indeks prelamanja ili u odnosu na koncentraciju dopanata [2]. Parametri koji mogu da se unose prilikom definisanja profila su: širina regiona, indeks prelamanja, oblik profila i talasna dužina. Oblik profila može biti konstantan ili predstavljen preko parabolične, eksponencijalne ili Gausove funkcije. Postoji i mogućnost definisanja osobina materijala, određivanje baznog materijala i dopanata. U našem slučaju biramo definisanje profila prema indeksu prelamanja, sa dva regiona (za jezgro i omotač), sa poluprečnikom jezgra 4,15 μm i indeksom prelamanja 1.45213, dok je poluprečnik omotača 58,35 μm sa indeksom prelamanja 1.44692. Ove vrednosti za jezgro i omotač su izabrane jer najbliži odgovaraju standardnim vrednostima monomodnog optičkog vlakna. Talasna dužina je 1.3 μm , Profil monomodnog optičkog vlakna prikazan je na sl. 3.



Sl. 3. Profil monomodnog optičkog vlakna.

A. Proračun modova i prikaz linija polja optičkog vlakna

Za određivanje i grafički prikaz parametara optičkog vlakna prvo je potrebno izvršiti proračun njegovih modova. Prilikom proračuna modova imamo mogućnost izbora kojom metodom ćemo proračunavati modove, diferencijalnom, matričnom ili vektorskom. Možemo da unosimo početni i krajnji mod između kojih će se vršiti proračun, kao i maksimalan broj modova.



Sl. 4. Prikaz linija polja optičkog vlakna.

U ovom slučaju za proračun biramo matričnu metodu, *LP Modes (Matrix Method)*, stavljamo da maksimalan broj modova bude 10, a da se proračun vrši od nultog do desetog reda moda. Po završetku proračuna dobijamo va

moda, LP(0,1) i LP(1,1), pri čemu biramo mod LP(0,1), sa efektivnim indeksom 1.4497657, a linije polja su prikazane na sl. 4.

B. Prikaz disperzionog modela optičkog vlakna

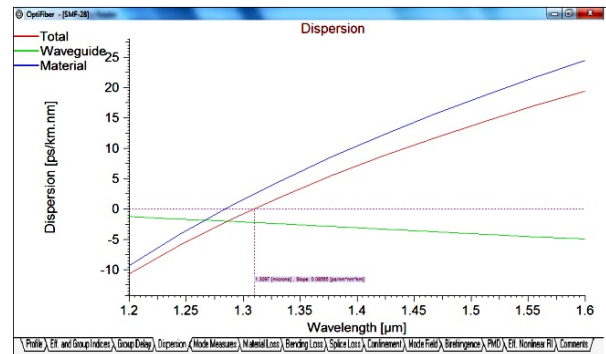
Disperzija je vremenska distorzija optičkog signala kao posledica komponenti više talasnih dužina koje se prostiru kroz vlakno na različitim talasnim dužinama, rezultujući širenjem impulsa. Dve vrste disperzije, disperzije materijala i talasovodne disperzije. Disperzija materijala se izračunava po formuli:

$$d_m = -\frac{\lambda L}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

gdje je c brzina prostiranja svetlosti u slobodnom prostoru, L dužina, n indeks prelamanja materijala, λ talasna dužina. Talasovodna disperzija proračunava se po formuli:

$$d_{wg} = -\frac{\lambda L}{c} \frac{d^2 N_{eff}}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

gde je N_{eff} efektivni indeks prelamanja [3]. Prikaz disperzije u zavisnosti od talasne dužine dat je na sl. 5.



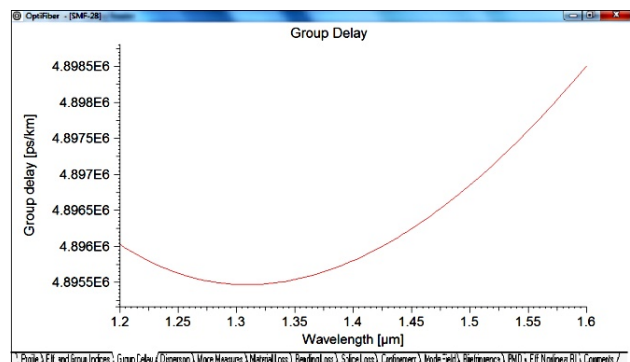
Sl. 5. Prikaz disperzije optičkog vlakna

C. Prikaz grupnog kašnjenja

Grupno kašnjenje na dužini L predstavljeno je formulom:

$$\tau_g = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} \frac{d\beta}{dk_0}, \quad (5)$$

gde je c brzina prostiranja svetlosti u slobodnom prostoru, β fazni koeficijent a $k_0 = w\sqrt{\epsilon_0\mu_c}$. Pri proračunu grupnog kašnjenja jako je bitan uticaj disperzije na njega, a upravo taj uticaj je bitan za informacijski kapacitet sistema za prenos. Prikaz grupnog kašnjenja u zavisnosti od talasne dužine dat je na sl. 6.



Sl. 6. Prikaz grupnog kašnjenja.

D. Prikaz moda prečnika polja i moda efektivne površine

Mod prečnika polja određuje nam širinu talasa, koja može biti veća ili manja od jezgra [4]. Postoji mod prečnika polja bliži polju, koji se proračunava formulom:

$$d_n = 2\sqrt{2} \frac{\int_0^\infty e^2(r)r^3 dr}{\int_0^\infty e^2(r)r dr} \quad (6)$$

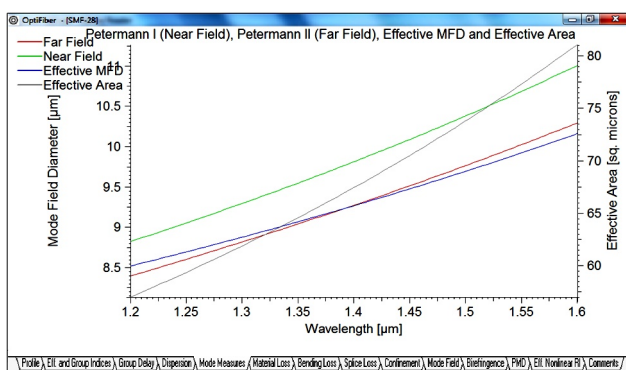
i mod prečnika polja dalje od polja, definisan formulom:

$$d_f = 2\sqrt{2} \frac{\int_0^\infty E^2(\rho)\rho^3 d\rho}{\int_0^\infty E^2(\rho)\rho d\rho} \quad (7)$$

Pri čemu posmatramo prostorno blizu polja optičku distribuciju amplitude $e(r)$ gde je r radijalna koordinata, kao i ugaonu disperziju amplitude daleko od polja $E(\rho)$, gde je ρ ugaona promenljiva. Efektivna površina modeluje polje kao konstantnu vrednost u određenom području vlakna i proračunava se po formuli:

$$A_{ef} = \frac{\left[\int \int I(r, \theta) r dr d\theta \right]^2}{\int \int I^2(r, \theta) r dr d\theta} \quad (8)$$

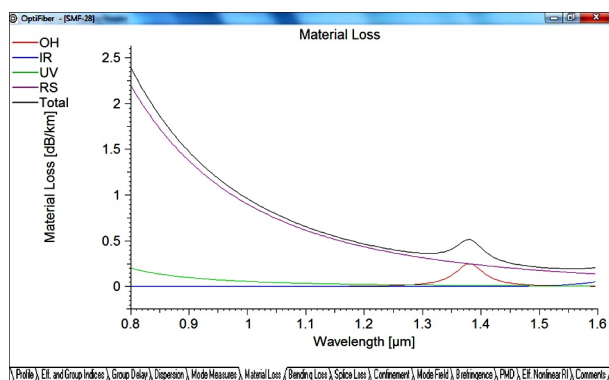
Prikaz moda prečnika polja i efektivne površine u zavisnosti od talasne dužine predstavljen je na sl. 7.



Sl. 7. Prikaz moda prečnika polja i efektivne površine.

E. Prikaz gubitaka u vlaknu

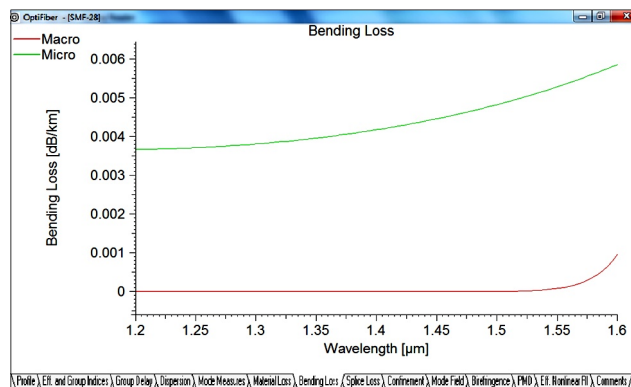
Gubici u materijalu nastaju pri UV i IR apsorpciji i apsorpciji usled prisustva jona OH. Takođe na gubitke u materijalu utiče i Rejljevo rasejanje, prikaz slabljenja usled ovih gubitaka u materijalu dat je na sl. 8.



Sl. 8. Prikaz gubitaka u materijalu

Gubici koji se javljaju pri savijanju vlakna mogu da potiču od savijanja ose optičkog vlakna i oni predstavljaju

gubitke usled makrosavijanja. Gubici usled slučajne varijacije pravca ose i slučajne varijacije poluprečnika krivine predstavljaju gubitke usled mikrosavijanja optičkog vlakna. Na slici 9. predstavljeni su ovi gubici.

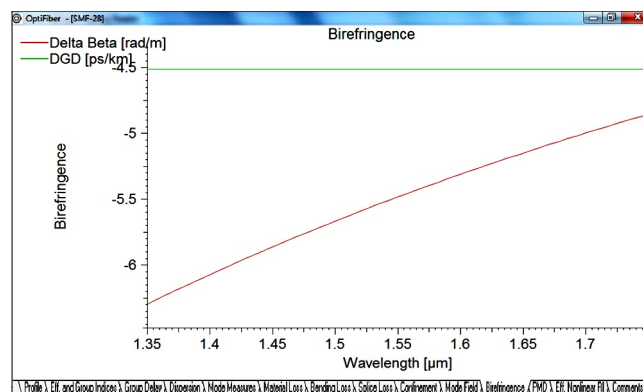


Sl. 9. Prikaz gubitaka pri savijanju optičkog vlakna

Kod monomodnog optičkog vlakna postoje dva moda koji su ortogonalno polarizovani i oni imaju identične karakteristike grupnog kašnjenja. Svaka promena u preseku vlakna izazvaće razliku u indeksu prelamanja kog "vide" dva moda. Ta pojava se naziva birfringencija i definiše se kao razlika konstanti propagacije polarizacionih sopstvenih modova i dato je relacijom:

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y \quad (9)$$

Na sl. 10 pored birfringencije predstavljeno je diferencijalno grupno kašnjenje.



Sl. 10. Prikaz birfringencije optičkog vlakna.

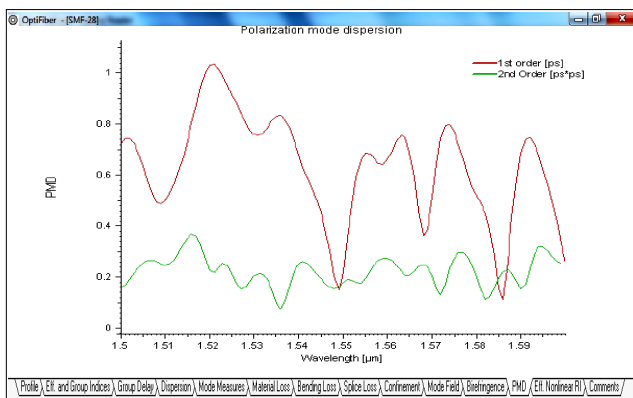
Polarizacioni disperzioni mod nastaje usled nesavršenog geometrijskog oblika jezgra optičkog vlakna, odnosno usled eliptičnog oblika jezgra. Za prikaz PMD koristili smo spektralnu simulaciju. Diferencijalno grupno kašnjenje, koje proračunava model stohastičkog vlakna, kvantifikuje prvi red PMD i predstavlja diskretan model PMD. Drugi red polarizacionog disperzionog moda predstavljen je jednačinom:

$$\Delta\tau_w(w, z) = |\Omega_w(w, z)| \quad (10)$$

gde je $\Omega_w(w, z)$ prvi izvod frekvencije disperzionog vektora Ω , predstavljan jednačinom:

$$\Omega_w(w, z) = \frac{\partial\Omega(w, z)}{\partial w} \quad (11)$$

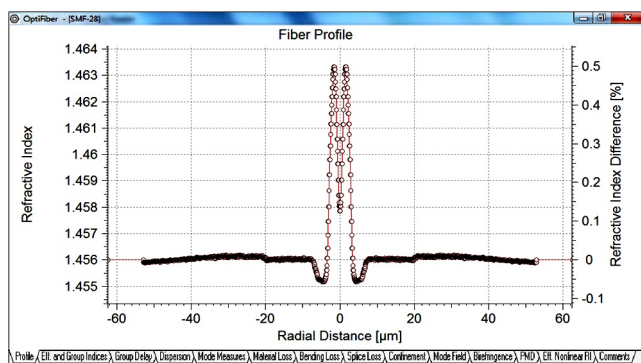
Prikaz PMD predstavljen je na sl. 11.



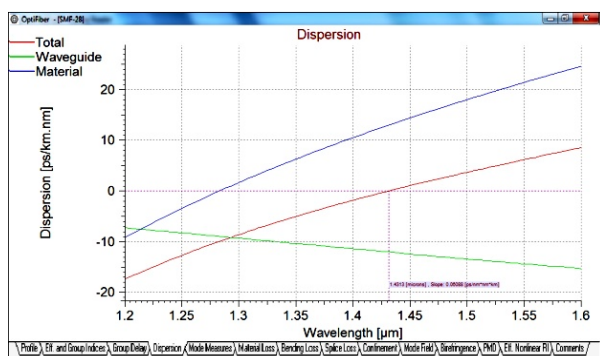
Sl. 11. Prikaz PMD optičkog vlakna.

IV. KARAKTERIZACIJA REALNOG OPTIČKOG VLAKNA

Karakterizacija realnog vlakna u *OptiFiber* softverskom alatu se vrši tako što eksperimentalnim merenjem realnog optičkog vlakna uz pomoć EXFO NR-9200 optičkog analizera snimamo profil vlakna. Snimljeni rezultat merenja se čuva u fajlu koji se ubacuje u *OptiFiber*, gde će biti izvršeno dalje projektovanje [1]. Optički analajzer EXFO NR-9200 obezbeđuje karakterizaciju indeksa prelamanja, geometrije i moda polja kod optičkih vlakana. Za određivanje rezultata ovaj instrument koristi prelamanje u blizini polja i tehnike za prenos tih izmerenih vrednosti u blizini polja. Prikaz profila koji je eksperimentalno snimljen može se videti u prozoru sl. 12. Prikazani profil predstavlja optičko vlakno sa velikim brojem slojeva. Prikaz disperzije realnog optičkog vlakna predstavljen je na sl. 13.



Sl. 12. Prikaz eksperimentalnog profila snimljenog nad realnim optičkim vlaknom [2].



Sl. 13. Prikaz disperzije realnog optičkog vlakna.

V. ZAKLJUČAK

Upoređivanjem dobijenih rezultata pri projektovanju sa tipičnim vrednostima, vidimo da dobijeni rezultati projektovanog vlakna u velikoj meri odgovaraju tipičnim vrednostima. Kod projektovanja monomodnog optičkog vlakna svi parametri koji utiču na kvalitet optičkog vlakna posmatrani su u zavisnosti od talasne dužine, a dobijeni rezultati u velikoj meri odgovaraju tipičnim vrednostima, što dovodi do zaključka da je ovako isprojektovano monomodno vlakno pogodno za korišćenje u nekom optičkom sistemu. Karakterizacijom realnog optičkog vlakna pomoću *OptiFiber* softverskog alata, samo je pokazano na koliko brži, efikasniji i jeftiniji način može da se dođe do ispitanih parametara optičkog vlakna u odnosu na eksperimentalne laboratorijske metode.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru projekta pod red. br. ugovora 11006.

LITERATURA

- [1] John Crisp, "Introduction to Fiber Optics", Biddles Ltd, Great Britain, 2001.
- [2] Fiber CAD.pdf, Technical documentation OptiFiber, <http://www.optiwave.com>
- [3] Miloš B. Živanov, Miloš P. Slankamenac, "Optoelektronika, praktikum za laboratorijske vežbe", Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Edicija: Univerzitetski udžbenik, Novi Sad, 2006.
- [4] John Powers, "Introduction to fiber Optics System", McGraw-Hill International Editions, USA, 1996.

ABSTRACT

This paper describes the design of single-mode optical fiber in OptiFiber software tools, and presents a comparison of the results obtained with typical values of optical fiber. Also in the paper made more characterizing a real fiber sample, the profile optical fiber has been recorded with optical fiber analyzer NR-9200 from EXFO Inc. and the result inserted in OptiFiber, where the design have done in real fibers.

SOFTWARE DESIGN OF OPTICAL FIBERS

Radoslav Radovanović, Nikola Stojanović, Miloš Slankamenac, Miloš Živanov