

MIRJANA M. KOSTIĆ¹
PETAR D. ŠKUNDRIĆ¹
NIKOLA B. VOJKOVIĆ²
RADOSLAV R. ALEKSIĆ¹

¹Tehnološko–metalurški fakultet,
Beograd

²Institut FKS, Jagodina

PREGLEDNI RAD

679.76

POLIMERNA OPTIČKA VLAKNA DANAS

U ovom radu dat je kratak pregled razvoja polimernih optičkih vlakana. Takođe, razmatrani su principi provođenja svetlosti optičkim vlaknima, kao i njihova klasifikacija. Naročita pažnja posvećena je materijalima i postupcima za dobijanje polimernih optičkih vlakana, a razmatrana su i njihova svojstva. U radu je ukazano na glavne nedostatke komercijalno dostupnih polimernih optičkih vlakana: visok stepen slabljenja, niske radne temperature i male propusne opsege. Njihov dalji razvoj usmeren je u pravcu poboljšanja ovih karakteristika. Očekuje se da će nova generacija polimernih optičkih vlakana visokih performansi uspešno zadovoljiti zahteve tržišta.

RAZVOJ POLIMERNIH OPTIČKIH VLAKANA

Optička vlakna se mogu definisati kao provodnici elektromagnetnog zračenja (talasnih dužina od vidljivog spektra do bliskog IC spektra [1]), duž transparentnog dielektričnog vlakna, pri čemu se provođenje zasniva na totalnoj refleksiji [2]. Mogućnost korišćenja optičkih vlakana u telekomunikacijama prvi put je ozbiljno razmatrana od strane Kao–a 1966. godine, u radu [3] koji se bavio elektromagnetnom teorijom propagacije u takvom dielektričnom talasovodu, da bi 1969. godine, takođe, Kao [4] pokazao da postoje materijali sa veoma malim gubicima. Da bi uspešno provodilo elektromagnetni talas, vlakno je konstruisano tako da se sastoji iz omotača i jezgra koje ima nešto veći indeks prelamanja i po njemu se prenosi najveći deo snage optičkog nosioca [5,6]. U zavisnosti od toga da li je jezgro od stakla, da li je multikomponentno ili je izrađeno od polimera, razlikujemo i tri grupe optičkih vlakana. Stakleno optičko vlakno se koristi za optičku komunikaciju na velikim razdaljinama uključujući i javne veze na nekoliko stotina kilometara uz neznatne gubitke intenziteta signala koji mogu da budu 1 dB/km, a i manje. Multikomponentno optičko vlakno se koristi za komunikacije na srednjim razdaljinama od 1 do 2 km. U poređenju sa njima polimerna optička vlakna (POF–eng. Polymer Optical Fiber ili Plastic Optical Fiber) deluju vrlo skromno sa svojom dužinom prenosa reda nekoliko stotina metara, ali zato poseduju druge prednosti [7]. U poređenju sa staklenim optičkim vlaknima komercijalna polimerna optička vlakna imaju četiri puta veće slabljenje [8,9] ali i značajne prednosti: jeftinija su, njima se lako rukuje, manje su mase, poseduju veliku fleksibilnost, kao i otpornost na sabijanje i vibracije, lako se spajaju međusobno i sa

izvorom, zato što imaju velike numeričke aperture (0,5 u odnosu na 0,14 za staklena vlakna) i velike prečnike jezgra (do 1 mm u odnosu na 125 μ m staklenih vlakana) [5,10–12]. Zbog ovakvih prednosti područja primene POF se znatno proširuju od početnih: jednostavni displeji i svetlo vodi do optičkih senzora, prenosa podataka i slično.

Prvo polimerno optičko vlakno sa jezgrom od polistirena komercijalizovano je ranih šezdesetih i karakterisalo se slabljenjem od 5000 dB/km [7], da bi 1968. godine Du Pont formirao polimerno optičko vlakno sa jezgrom od polimetilmetakrilata (PMMA) i slabljenjem od 500 dB/km, koje se pojavilo na tržištu pod imenom Crofon [2,10].

Tokom sedamdesetih godina dve kompanije su radile na daljem komercijalnom razvoju polimernih optičkih vlakana na bazi PMMA: Du Pont u USA i Mitsubishi Rayon u Japanu. Mitsubishi je, 1974. godine, patentirao ispredanje iz rastopa jednostavnih svetlovoda tipa jezgro–omotač, sa minimalnim slabljenjem od 3500 dB/km. Iste godine Mitsubishi patentira i kontinualni proces livenja visokočistih akrilata, što prethodi razvoju Eska vlakna sa polimetilmetakrilatnim jezgrom i polifluoroalkil–metakrilatnim omotačem i minimalnim slabljenjem od 125 dB/km na talasnoj dužini od 567 nm [10]. Sredinom sedamdesetih, u Du Pont–u, dobijeno je vlakno sa PMMA–D8 jezgrom i slabljenjem manjim od 200 dB/km, ali na većoj talasnoj dužini – 790 nm [10]. Za dalji razvoj POF značajan je rad Kaino–a i saradnika [13–15] na NNT(s) Ibaraki laboratoriji, koji je doveo do smanjenja slabljenja vlakna sa PMMA jezgrom na 55 dB/km (567 nm) i vlakana sa PMMA–D8 jezgrom na 20 dB/km.

Od osamdesetih godina pa do danas pojavio se veliki broj istraživača i proizvođača u oblasti polimernih optičkih vlakana, pa je teško načiniti klasifikaciju njihovih doprinosa razvoju polimernih optičkih vlakana. U tabeli 1 dat je kratak pregled razvoja POF.

Adresa autora: M. Kostić, Tehnološko–metalurški fakultet, Karadjijevo 4, P.F. 494, 11000 Beograd
Rad prijavljen: Juli 26, 1999.
Rad prihvaćen: Decembar 29, 1999.

Tabela 1. Pregled razvoja polimernih optičkih vlakana [16]
Table 1. Review of polymer optical fibers development [16]

Organizacija	Materijal za jezgro	Materijal za omotač	Tip POF	Min. slabljenje dB/km	λ nm	Godina	Komentar
Du Pont	PMMA	fluoro-polimer	SI	500	650	1968	
Toray	PS	PMMA	SI	1100	670	1972	
Du Pont	PMMA-d8		SI	180	790	1977	Za blisku IR-oblast
Mitsubishi Rayon	PMMA	fluoro-polimer	SI	300	650	1978	
NTT	PMMA	fluoro-polimer	SI	55	568	1982	
NTT	PS		SI	114	670	1982	
Univerzitet Keio	MMA co VPAC	PMMA	GI	1070	670	1982	
NTT	PMMA-d8		SI	20	650	1983	
Mitsubishi Rayon	PMMA	fluoro-polimer	SI	110	570	1983	
Asahi Chemical	PMMA	fluoro-polimer	SI	80	570	1985	
Fujitsu	PC	poliolefin	SI	450	770	1986	Toplopostojano
NTT	P(5F3DSt)	fluoro-polimer	SI	178	850	1986	Za blisku IR-oblast
Hitachi	Termo-reaktivni polimer	fluoro-polimer	SI	600	650	1987	Toplopostojano
Univerzitet Keio	MMA co VB	PMMA	GI	130	650	1990	
Hoechst Celanese	PMMA	fluoro-polimer	SI	130	650	1991	
Univerzitet Keio	PMMA-d8	PMMA-d8	GI	56	688	1992	Širok propusni opseg (2GHzkm)
Bridgestone	siloksan	siloksan	SI	800	650	1993	

SI POF – dvoslojno polimerno optičko vlakno

GI POF – gradijentno polimerno optičko vlakno

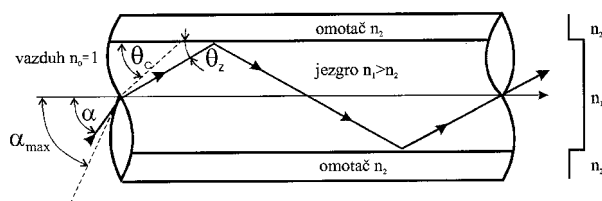
PMMA – polimetilmetakrilat; PS – polistiren; PMMA-d8 – deuterovani PMMA; PC – polikarbonat; P5F3DSt – pentafluorotrideuterostiren; MMA co VPAC – kopolimer metilmetakrilata i vinilfenilacetata; MMA co VB – kopolimer metilmetakrilata i vinilbenzoata

PRINCIPI PROVOĐENJA SVETLOSTI OPTIČKIM VLAKNIMA

Princip provođenja svetlosti optičkim vlaknima otkrio je britanski fizičar John Tyndall, davne 1854. godine, posmatrajući svetlost provodenu vodenim tokom koji utiče i ističe iz rezervoara [1,2].

Svetlost se prostire kroz vlakno zbog niza refleksija od jednog do drugog njegovog boka. Prijemni (upadni) ugao svetlosnog snopa pri ulazu u vlakno mora biti dovoljno mali kako bi mogla nastati njegova refleksija. Na slici 1 prikazan je detalj optičkog vlakna sa skokovitim indeksom prelamanja, što znači da postoji nagla promena indeksa prelamanja između jezgra (n_1) i omotača (n_2). Da bi svetlosni snop mogao slobodno, bez gubitaka, da "skače" od zida do zida, na vlakno je nanesen omotač. Omotač služi kao ogledalo za refleksiju optičkog snopa bez gubitka snage, sprečava "bežanje" svetlosti u susjedna vlakna, ako se ona vezuju u snopove i omogućava povećanje mehaničke čvrstoće vlakana.

Zraci koji se prostiru u jezgru optičkog vlakna pod uglovima $0 \leq \theta_z < \theta_c$ u odnosu na njegovu osu (slika 1) biće potpuno reflektovani na granici jezgro-omotač, pri čemu je θ_c ugao totalne unutrašnje refleksije određen odnosom:



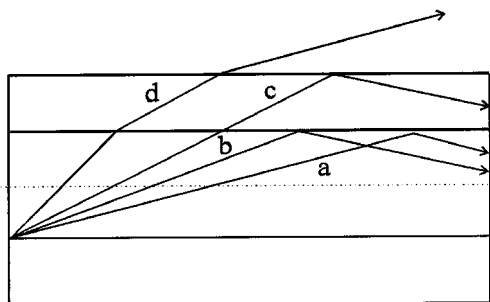
Slika 1. Višemedno dvoslojno vlakno [1]

Figure 1. Step index type multi mode optical fiber [1]

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Ako je $0_c < \theta_z < \pi/2$ zraci koji dolaze spolja na presek vlakna prolaziće u omotač, slika 1 [1]. Takođe, treba praviti razliku između zraka koji se prostiru u ravni koja sadrži osu vlakna – **meridijalni zraci**; i svih ostalih zraka koji ne presecaju osu vlakna i nazivaju se – **kosi zraci** [17].

Dokazano je da se po jednom optičkom vlaknu istovremeno može prostirati samo određeni diskretni snop elektromagnetnih talasa, od kojih svaki predstavlja **vlakno**



Slika 2. Modovi u dvoslojnom vlaknu [1]
Figure 2. Modes in a step index optical fiber [1]

titi talas ili mod. U frontu talasa svakog moda oscilacije se šire sa zajedničkom fazom. Talasi u jezgru koji odgovaraju zracima čije trajektorije stvaraju male uglove sa osom vlakna, nazivaju se modovi niskog reda, a trajektorije koje stvaraju veće uglove sa osom vlakna – modovi viših redova [1].

Svetlosni signal uveden u vlakno može se širiti samo po jezgru (modovi označeni sa **a** i **b** na slici 2), dok se deo zraka koji prodiru u omotač optičkog vlakna (mod **c**) može prostirati na relativno kratkim rastojanjima, izlazeći potom izvan omotača (mod **d**). Modovi **c** i **d** imaju parazitni karakter, ali ih je praktično nemoguće izbeći pri pobuđivanju vlakna.

Broj usmerenih modova N u optičkom vlaknu uvek je konačan i može se odrediti ako su poznati: talasna dužina prijemne svetlosti (λ), poluprečnik jezgra vlakna (r), razlika indeksa prelamanja jezgra i omotača (za dvoslojno vlakno) ili funkcija $n(r)$, n_{\max} i n_2 (za gradijentno vlakno) i numerička apertura svetlovoda. Broj usmerenih modova za dvoslojno vlakno je [6]:

$$N = \frac{2\pi^2 r^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2) \quad (2)$$

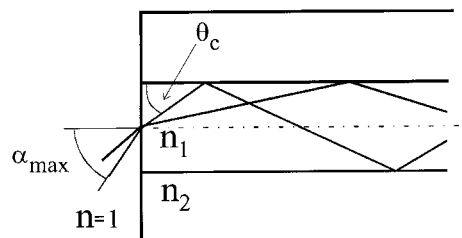
Za gradijentna vlakna sa promenom indeksa prelamanja bliskom paraboličnom, pri jednakoj talasnoj dužini λ i vrednostima n_2 i $n_{\max} = n_1$, broj usmerenih modova je dva puta manji.

Po režimu rada razlikuju se **jednomodna (monomodna)** vlakna kod kojih je $N=1$ i **višemodna (multimodna)** vlakna po čijem se jezgru mogu širiti stotine i hiljade modova. S obzirom da su optička vlakna, u stvari, dielektrični talasovodi, a dimenzije ovih talasovoda iznose više talasnih dužina, po optičkim vlaknima se, u opštem slučaju, prostire veći broj talasa. Kako svaki tip talasa (mod) ima svoj fazni koeficijent i svoju grupnu brzinu, a ukupna snaga optičkog signala se deli na sve prostiruće talase, to će modulirani optički talas pretrpeti izobličenja u prenosu. Rezultat toga je proširenje impulsa pri prostiranju kroz vlakno, za iznos vremenskog intervala između prostiranja najbržeg i najsporijeg talasa kroz vlakno. Sve ovo vrlo brzo smanjuje informacijski kapacitet vlakna, a posredno i domet veze. Informacijski kapacitet vlakna može se mnogostruko povećati, ako se

dozvoli prostiranje samo jednog tipa talasa po vlaknu (monomodno vlakno), jer je u tom slučaju širina propusnog opsega određena, praktično, samo disperzijom materijala. Pobuđivanje takvog vlakna moguće je (i celishodno) samo korišćenjem izvora zračenja sa vrlo uskim spektrom talasnih dužina, tj. monohromatskim zračenjem. Male dimenzije prečnika jezgra monomodnog vlakna otežavaju njegovo pobuđivanje i zahtevaju veoma precizno i dobro centrirano spajanje ovih vlakana. Uslov pod kojim će vlakno raditi u režimu jednog tipa talasa nalazi se rešavanjem Maxwell-ovih jednačina [5,17,18].

Po načinu varijacije indeksa prelamanja po poprečnom preseku vlakna, razlikuju se dva osnovna tipa vlakna: **dvoslojna (SI-eng. Step Index)**, kod kojih je indeks prelamanja jezgra n_1 , homogen po poprečnom preseku vlakna i veći od indeksa prelamanja omotača n_2 ; i **gradijentna (GI-eng. Grade Index)**, kod kojih se indeks prelamanja jezgra menja po nekom zakonu $n_1(r)$, a indeks prelamanja omotača je konstantan i manji od najmanje vrednosti $n_1(r)$ [19]. Velika nepogodnost najprostijeg dvoslojnog vlakna je njegov mali propusni opseg. Svetlost se u njegovom jezgru prostire pod različitim uglovima u odnosu na osu vlakna (slika 3) i ovi različiti uglovi rezultuju promenljivim dužinama optičkog puta. Ukoliko se kratko pulsirajuće svetlo usmeri na vlakno, deo njegove optičke snage putuje direktno duž ose do kraja vlakna, dok drugi deo sledi cik-cak putanju i stiže kasnije zbog toga što prelazi duži put (odnos maksimalnog prema minimalnom kašnjenju isti je kao i odnos indeksa prelamanja jezgra n_1 prema indeksu prelamanja omotača n_2 ; razlika je oko 1%) [20]. Rezultat toga je da se širina inicijalnog kratkog pulsirajućeg svetla stalno povećava pri prolasku kroz vlakno i puls koji se javlja na kraju vlakna postaje sve rašireniji što je vlakno duže i što je veća razlika njihovog indeksa prelamanja.

Ovaj aspekt ponašanja vlakna može se uporediti sa slabopropusnim filterima čiji se propusni opseg smanjuje što je vlakno duže, čime se ograničava transmisija visokofrekventnog signala. To se može u velikoj meri izbeći ukoliko se postigne da se indeks prelamanja u jezgru vlakna smanjuje parabolično sa radijalnim rastojanjem od maksimuma $n(0)$ na osi vlakna do vrednosti n_2 u omotaču.



Slika 3. Prostiranje zraka u dvoslojnom vlaknu [20]: n_1 - indeks prelamanja jezgra; n_2 - indeks prelamanja omotača; α_{\max} - upadni ugao talasovoda; θ_c - ugao potpune unutrašnje refleksije
Figure 3. Ray diagram for a step index fiber [20]: n_1 - core refractive index; n_2 - cladding refractive index; α_{\max} - acceptance angle of waveguide; θ_c - angle of total internal reflection

Kod gradijentnog vlakna, ovog tipa, svetlo umesto da ide cik-cak sledi talasasti tok sa periodom od nekoliko milimetara. Veću dužinu zaobilaznih putanja svetlo van ose vlakna nadoknađuje time što putuje brže zahvaljujući manjem indeksu prelamanja, tako da svim svetlosnim komponentama treba isto vreme da bi došle do kraja vlakna. Sada se mogu proizvoditi gradijentna vlakna čiji je profil indeksa prelamanja toliko blizu idealnom da se za vreme putovanja od 5 μ s po 1 km vlakna, javljaju razlike u kašnjenju od samo ± 0.1 ns/km.

Detaljnije o prostiranju elektromagnetnih talasa u vodećim strukturama (dvoslojna i gradijentna, monomodna i multimodna vlakna), izračunavanju odgovarajućih jednačina prostiranja polazeći od Maxwell-ovih jednačina ili od zakona geometrijske optike može se naći u literaturi [3,5,6,17–19,21,22].

Vlakna, o kojima je do sada bilo reči, imaju fazne koeficijente nezavisne od polarizacije talasa koji se prostire kroz vlakno. Ako bi se takva vlakna pobudila linearno polarisanim talasom, ravan polarizacije bi se održavala i ne bi se menjalo stanje polarizacije pri prostiranju. Za vlakna čije su karakteristike prostiranja zavisne od polarizacije pobudnog polja, kaže se da su **polarizaciono anizotropna**, tj. reč je o **vlaknima sa polarizaciono zavisnim karakteristikama**. Da bi se konstruisala vlakna koja dobro održavaju stanje polarizacije, danas se uveliko proučavaju polarizaciona anizotropija koja potiče od oblika jezgra vlakna, mehaničkih naprezanja vlakna ili kombinovanog dejstva [5].

Tipičan primer vlakana sa izrazitim polarizaciono-anizotropnim karakteristikama su vlakna sa dopiranim jezgrom. Osnovni materijal za jezgro ovih POF je PMMA dopiran organskim bojama [23–30]. POF sa aktivnim dodacima omogućavaju da se energija nuklearnih zračenja ili UV zraka pretvori u energiju zračenja u vidljivom delu spektra [25,31], što omogućava vizuelizaciju i registrovanje procesa npr. u aktivnoj zoni nuklearnog reaktora, kao i izradu čitavog niza senzora tipa faznog modulatora, npr. žiroskop, optički detektor vlage u vazduhu, i sl. [28,32].

SVOJSTVA POLIMERNIH OPTIČKIH VLAKANA

Svaka primena optičkih vlakana zahteva određena optička, geometrijska i fiziko-mehanička svojstva vlakana, tako da pri izboru POF za određenu namenu potrebno je uzeti u obzir šest njegovih osnovnih karakteristika.

1. Numerička apertura (ili numerička otvorenost) NA. Posmatranjem prostiranja zraka koji padaju spolja na poprečni presek vlakna i zraka koji prodiru u jezgro (slika 1) može se uočiti da svakoj vrednosti ugla θ odgovara određena vrednost ugla α pod kojim svetlosni zrak pada na poprečni presek. Ugao α_{\max} pri kom se zrak posle refleksije na granici jezgro-omotač širi u vlaknu pod uglom totalne refleksije θ_c prema osi jezgra, naziva se upadni ugao optičkog vlakna. Njegova vrednost se može izraziti u stepenima, ali se taj ugao češće

daje kao numerička apertura (otvora) NA, tj. mera sposobnosti skupljanja svetlosti u optičkom vlaknu:

$$NA = n_0 \cdot \sin(\alpha_{\max}) \quad (3)$$

gde je: n_0 – indeks prelamanja sredine iz koje pada zrak na poprečni presek vlakna.

Ako je optičko vlakno okruženo vazduhom ($n_0 = 1$) onda je $NA = \sin \alpha_{\max}$. Za dvoslojno optičko vlakno brojna vrednost numeričke aperture dobija se iz izraza: $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, dok se za gradijentna vlakna uzimaju sledeći odnosi:

$$\sin \alpha_{\max} = \sqrt{n^2(r) - n_2^2}; \quad (4)$$

$$n(r) = \sqrt{n_1^2 - NA^2 (r/a)^2}; \quad (5)$$

$$NA = \sqrt{n_{\max}^2 - n_2^2}, \quad (6)$$

gde je n_{\max} – najveća vrednost indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna [1,19]. Indeks prelamanja polimera koji se koriste za proizvodnju optičkih vlakana varira od 1.32 za materijale na bazi fluorovanih akrilata, do oko 1.6 za neke vrste fenolnih smola, tako da polimerna optička vlakna imaju velike numeričke aperture (oko 0.5) što odgovara upadnom uglu optičkog vlakna od 60° u odnosu na 16° za staklena vlakna [10].

Efikasnost pobuđivanja vlakna zavisi od veličine numeričke aperture i u slučaju vlakna sa konstantnim indeksom prelamanja jezgra najveća efikasnost pobuđivanja jednaka je kvadratu numeričke aperture vlakna. Pri tome, poluprečnik zračućeg otvora treba da je manji ili jednak poluprečniku jezgra vlakna. Vlakno sa promenljivim indeksom prelamanja imaće manju efikasnost pobuđivanja, jer kod ovih vlakana numerička apertura se smanjuje sa r [5].

Velika numerička apertura i veliki upadni ugao POF, takođe, omogućava primenu manje kompleksnih konektora i veću toleranciju pri spajanju vlakana, što dodatno smanjuje cenu sistema [10].

2. Disperzija. Pri prolasku impulsa svetlosti kroz optičko vlakno ne menja se samo njegova amplituda, nego i oblik – impuls se proširuje, a ova pojava se naziva disperzijom. Razlikuju se intramodna (talasovodna i disperzija materijala) i intermodna (međutalasná) disperzija [1,5,19,20].

Intramodna disperzija impulsa nastaje zbog nemonohromatskog zračenja koje se uvodi u optičko vlakno (spektar zračenja svakog optičkog izvora koji se koristi u svetlovodnim prenosnim sistemima ima konačnu širinu). Razlikuje se: zavisnost indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna od talasne dužine upotrebljene svetlosti (disperzija materijala) i promena modne strukture zračenja koje prolazi kroz optičko vlakno pri promeni talasne dužine (talasovodna disperzije). Disperzija materijala je dominantna kod monomodnih vlakana i proporcionalna je veličini $(\lambda/c) d^2 n/d \lambda^2$ [33].

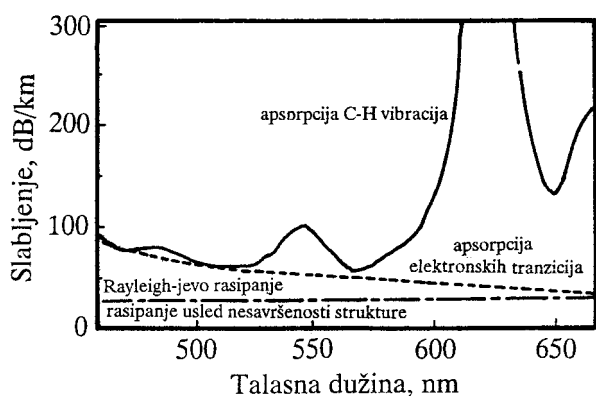
Intermodna disperzija je svojstvena multimodnim vlaknima, u kojima se istovremeno prenosi veći broj mo-

dova. Svaki mod ima svoju brzinu prostiranja, tako da je vreme prolaska različitih modova kroz vlakno različito. Zbog toga se svi modovi koji oblikuju optički signal ne pojavljuju na izlazu istovremeno, pa dolazi do proširenja impulsa. Intermodna disperzija je kritičan parametar koji vrlo brzo smanjuje informacijski kapacitet vlakna, a posredno i doomet veze [6]. Stoga je osnovni razlog za primenu, konstruktivno složenijeg, gradijentnog vlakna u optičkim telekomunikacijama njegovo svojstvo da ima znatno manju intermodnu disperziju u poređenju sa dvoslojnim multimodnim vlaknom. Dielektrično jezgro gradijentnog vlakna treba da svede na minimum razliku grupnih kašnjenja pojedinih talasa [5].

3. Slabljenje (transmisioni gubici). Pod slabljenjem se podrazumeva gubitak ili smanjenje amplitude signala koji se prenosi. Usmereni modovi prilikom širenja po optičkom vlaknu gube deo energije koju prenose zbog **rasipanja i apsorpcije svetlosti** u jezgri talasovoda. Uzroci slabljenja mogu biti "unutrašnji ili sopstveni" i posledica su karakteristika samog materijala i "spoljašnji" koji su posledica procesa proizvodnje vlakana ili sorpcije vlage iz vazduha, i mogu se sistematizovati kao [6,7,10,17,19,34,35]:

- | | |
|---------------------------------|--|
| Unutrašnji: | Spoljašnji: |
| • apsorpcija: | • apsorpcija: |
| – viših harmonika C–H vibracija | – prelaznim metalima |
| – elektronskih tranzicija | – organskim kontaminantima |
| | – jonima OH^- iz sorbovane vode |
| • rasipanje: | • rasipanje: |
| – Rayleigh–jevo rasipanje | – prašina i mikrošupljine |
| | – fluktuacija prečnika jezgra |
| | – dvojno prelamanje |
| | – nesavršenost granične površine jezgo – omotača |

Na slici 4 dat je spektar transmisionih gubitaka POF sa jezgrom od PMMA. Teorijska vrednost slabljenja vlakna sa jezgrom od PMMA, koje potiče od karakteristika samog polimera, je 106.2dB/km za $\lambda = 650$ nm, pri



Slika 4. Spektar transmisionih gubitaka POF sa jezgrom od PMMA [35]

Figure 4. Loss spectrum and loss factors for a PMMA core POF [35]

čemu gubici od 90dB/km nastaju usled apsorpcije viših harmonika C–H vibracija [7,36]. Stoga, da bi se dobilo optičko vlakno sa manjim gubicima, potrebno je zameniti vodonikov atom u C–H vezi nekim masivnijim atomom kao npr. deuterijumom [14,15,34,35] ili fluorom [36], pri čemu bi se slabljenje ovih vlakana moglo redukovati do teorijskih 5dB/km [7].

S obzirom da su savijanje ose optičkog vlakna i slučajne varijacije pravca ose i poluprečnika krivine redovna pojava pri polaganju optičkih kablova treba uzeti u obzir i gubitke izazvane savijanjem vlakana. Savijanje ose vlakna izaziva pojavu talasa zračenja u omotaču. Za krivine koje su velike u odnosu na talasnu dužinu, ovi gubici su mali pa se mogu zanemariti. U blizini kritičnog poluprečnika krivine gubici naglo rastu i dalje smanjenje ovog poluprečnika obično vodi velikim gubicima tako da prenos signala prestaje. Iz prirode pojave sleduje, da je od tačnog poznavanja samog slabljenja značajnije da se zna veličina kritičnog poluprečnika krivine. Za gradijentna vlakna kritični poluprečnici krivine su negde između 1 do 2cm, a manji od 1cm za dvoslojna vlakna. Vlakna po kojima se prostire jedan tip talasa imaju za gotovo red veličine manji kritični poluprečnik krivine, tj. mogu se oštrije savijati bez pojave velikih gubitaka [5,17,37,38–40].

4. Širina propusnog opsega. Širina frekventnog propusnog opsega, **B**, je vrlo važna karakteristika optičkog vlakna, i usko je povezana sa disperzijom. Zbog nastajanja disperzije impulsa zračenja unutar vlakna, propusni opseg vlakna ograničen je nekom frekvencijom f_B , pri kojoj se amplituda ne smanjuje više od polovine [1,19].

5. Vreme porasta je parametar na osnovu koga se ceni da li će odabrani delovi sistema funkcionisati potrebnom brzinom. Pomoću vremena porasta identifikuju se disperzione karakteristike nekog optičkog vlakna određene intermodnom disperzijom i/ili intramodnom disperzijom (disperzijom materijala). Da bi se odredilo ukupno vreme porasta nekog sistema, potrebno je još dodati vreme porasta svake vremenski kritične komponente i odgovarajuću toleranciju [1].

6. Jačina vlakna, odnosno prekidna jačina pri zahtevanju vlakna, je njegova mehanička karakteristika, na koju bitno utiče način proizvodnje vlakna, a on mora biti takav da u njemu eliminiše greške i mikropukotine. Krajnji cilj je dobijanje savršenih vlakana sa jezgrom, omotačem i površinama bez greške. Takođe, veliki značaj imaju i prekidne karakteristike pri savijanju optičkih vlakana, pri čemu minimalni prečnik krivine pri kome nastaje "pucanje" vlakna zavisi od poluprečnika vlakna i od materijala jezgra i omotača [1,2].

Pored poznavanja ovih šest osnovnih karakteristika potrebno je raspolagati i podacima o sledećim strukturnim parametrima vlakna: prečnik jezgra $2r$, prečnik omotača $2R$, odstupanje poprečnog preseka jezgra i omotača od kružnog, kao i odsustvo koncentričnosti omotača u odnosu na jezgro, indeks prelamanja jezgra

n_1 i indeks prelamanja omotača n_2 , a u slučaju gradijentnog vlakna $n_1 \max$ i karakter funkcije $n(r)$ [1,41].

Takođe, treba uzeti u obzir i varijacije indeksa prelamanja od srednje vrednosti koje imaju oblik haotičnih fluktuacija, na rastojanjima manjim od talasne dužine svetlosti. Ove mikroskopske fluktuacije indeksa prelamanja izazivaju Rayleigh–jevo rasipanje optičke snage i mogu se računati kao unutrašnji gubitak. Realna vlakna nisu nikad potpuno regularna i pored mikroskopskih fluktuacija, uslojenih haotičnom molekulskom strukturom materijala, indeks prelamanja može imati i makroskopska odstupanja. Poprečni presek jezgra, takođe, nije uvek potpuno okrugao (prisutna je eliptičnost) i varira u pravcu ose vlakna. Pored toga vlakna nikad nisu idealno prava (odstupanje ose vlakna od prave linije). Sve ove neregularnosti dovode do pojave spregnutih talasa. Modovi se ne prostiru nezavisno jedan od drugog i dolazi do "razmene" snage. Interakcija modova u neregularnim vlaknima dovodi do dopunskog slabljenja i deformisanja signala. Takođe, savijanje vlakna dovodi do značajne promene indeksa prelamanja i ono može izazvati "isticanje" modova iz vlakna [18].

MATERIJALI ZA POLIMERNA OPTIČKA VLAKNA

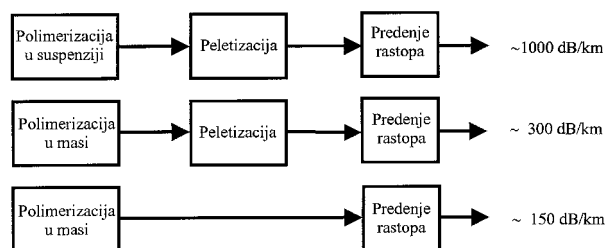
Materijali za jezgro POF su obično amorfni homopolimeri, zato što kristalni polimeri, kalemljeni polimeri, kao i statistički kopolimeri imaju tendenciju ka fluktuaciji gustine i raspodeli indeksa prelamanja što uzrokuje transmisionu gubitke. Jezgra komercijalno dostupnih POF izrađuju se od polimetilmetakrilata (PMMA), polistirena (PS), polikarbonata (PC) i polisiloksana [12,42]. S obzirom da omotač treba da ima manji indeks prelamanja od materijala jezgra, kao materijal za omotač uglavnom se koriste polimeri koji sadrže fluor: poliviniliden fluorid, teflon Fep, teflon AF, fluorovani metakrilat, fluorovani polikarbonat i drugi. Polimetilpenten se koristi kao omotač za POF iako ima relativno veliki indeks prelamanja ($n=1.59$), ako se kao jezgro koristi fluorovani polikarbonat [7, 10, 43–46].

Polimetilmetakrilat

Zbog balansa između karakteristika i troškova proizvodnje najviše korišćeno POF je upravo ono sa jezgrom od PMMA, tako na tržištu Japana 90% POF je na bazi PMMA [9].

Za proizvodnju jezgra POF koristi se PMMA dobijen polimerizovanjem u masi ili suspenziji. Polimerizovanje u masi, koje se izvodi u prisustvu samo inicijatora i regulatora molarnih masa, a sam monomer se ponaša kao rastvarač za polimer, pogodnije je sa aspekta transmisionih gubitaka. Takođe, korišćenje kontinualnog procesa polimerizovanje–predenje rastopa, tj. bez peletizacije polimera, daje vlakno sa manjim transmisionim gubicima (slika 5) [7, 10, 12].

Polistiren



Slika 5. Uticaj procesa proizvodnje POF sa jezgrom od PMMA na njegove transmisionu gubitke [7]

Figure 5. Processing methods and resulting transmission losses of a POF with PMMA as the core [7]

Iako je PMMA superiorniji u odnosu na PS kada su u pitanju mehanička svojstva i hemijska postojanost, PS se može koristiti kao materijal za jezgro polimernih optičkih vlakana sa malim gubicima zbog svojih sledećih karakteristika [13]:

- PS može biti dobijen polimerizacijom bez bilo kakvog inicijatora, koji je neophodan u slučaju PMMA, a koji ponekad može stvoriti mehuriće u toku reakcije polimerizacije;
- koeficijent higroskopnosti PS je za red veličine niži od koeficijenta PMMA, tako da su gubici usled apsorpcije jonima OH^- manji čak i u vlažnom okruženju [47];
- indeks prelamanja PS je 1.59, tako da se konvencionalni transparentni polimeri mogu koristiti za omotač.

Kaino i saradnici [13] su dobili vlakno sa jezgrom od PS i omotačem od kopolimera etilen–vinilacetata koje je imalo slabljenje od 114dB/km pri $\lambda = 670 \text{ nm}$ (tabela 1). Teorijska vrednost slabljenja POF, sa jezgrom od PS, je 70dB/km pri $\lambda = 670 \text{ nm}$.

Polikarbonat

Polikarbonati (PC) su složeni diestri karbonske kiseline i diola, i mogu biti: alifatični, alifatično–aromatični i aromatični. Alifatični PC imaju nisku temperaturu topljenja (ispod 125°C), dok alifatično–aromatični imaju višu temperaturu topljenja (oko 240°C). S obzirom na njihovu slabu otpornost na alkalije i toplotu, u proizvodnji vlakna jedino su aromatični PC na bazi bisfenola A našli industrijsku primenu [48].

Uprkos velikom slabljenju (oko 800dB/km pri $\lambda = 820 \text{ nm}$), PC se pojavljuje kao materijal za POF zbog svoje otpornosti na povišenu temperaturu, radne temperature ovih vlakana su do 125°C , što je za oko 30°C više nego u slučaju vlakana sa PMMA jezgrom. Pored toga prednosti PC su visok indeks prelamanja ($n=1.585$), što omogućava izbor jeftinijeg polimera za omotač, slaba sorpcija vode (0.2% pri $w=60\%$) i visoka fleksibilnost [9,49]. Danas, POF sa jezgrom od PC proizvode Mitsubishi Rayon, koji je prvi otpočeo komercijalnu proizvodnju 1986, Fujitsu, Teijin Kasei, Idemitsu Petrochemical i Asahi Kasei [7]. Slabljenje ovih vlakana je znatno veće

od teorijske vrednosti (gubici koji potiču od karakteristika samog polimera procenjuju se na 166dB/km za $\lambda = 650\text{--}656\text{nm}$) a glavni razlog za to je veliki broj čestica prašine čija je veličina jednaka ili veća od talasne dužine svetlosti. POF dobijena iz PC visoke čistoće imala bi slabljenje uporedivo sa slabljenjem PMMA-POF [50].

Ostali materijali za jezgra polimernih optičkih vlakana

Od nedavno, radi se na razvoju i drugih materijala za jezgra POF koji pokazuju otpornost na toplotu, tj. postojanost fiziko-mehaničkih svojstava i slabljenja pri dugotrajnijem korišćenju na povišenim temperaturama. S obzirom da je glavni razlog za povećanje slabljenja na povišenim temperaturama povećana apsorpcija usled elektronskih tranzicija vezanih za konjugovane dvostruke veze nastale termooksidacionim reakcijama polimera jezgra rešenje ovog problema treba tražiti u korišćenju umreženih polimera kao materijala za jezgro POF [8,9,51,52]. Sumitomo Denko je komercijalizovao vlakno sa jezgrom od polisiloksana, a Hitachi Densen vlakno sa jezgrom od termoreaktivnog polimera, kao omotač za oba vlakna korišćen je Teflon FEP [7,12].

POSTUPCI DOBIJANJA POLIMERNIH OPTIČKIH VLAKANA

Da bi optičko vlakno vršilo svoju funkciju treba da budu ispunjeni određeni uslovi, a najvažniji od njih su vrlo nizak sadržaj nepoželjnih primesa, visoka homogenost materijala jezgra, velika jačina i vrlo tačne dimenzije vlakna. Na sadržaj nepoželjnih primesa bitno utiče sam način izvođenja reakcije polimerizovanja i njegova osetljivost na kontaminaciju, pa prednost ima polimerizacija u masi [7,10]. Pri izboru materijala za dobijanje vlakana pored indeksa prelamanja jezgra i omotača, moraju se uzeti u obzir i drugi faktori: koeficijenti temperaturnog širenja, temperatura omekšavanja, indeks tečenja, nemešljivost polimera jezgra i omotača, a u cilju dobijanja i očuvanja, tokom eksploatacije, jasno definisane granične površine jezgro-omotač. Važna karakteristika je i prozračnost koja zajedno sa numeričkom aperturom (NA) u prvom redu određuje izbor materijala za vlakna [53].

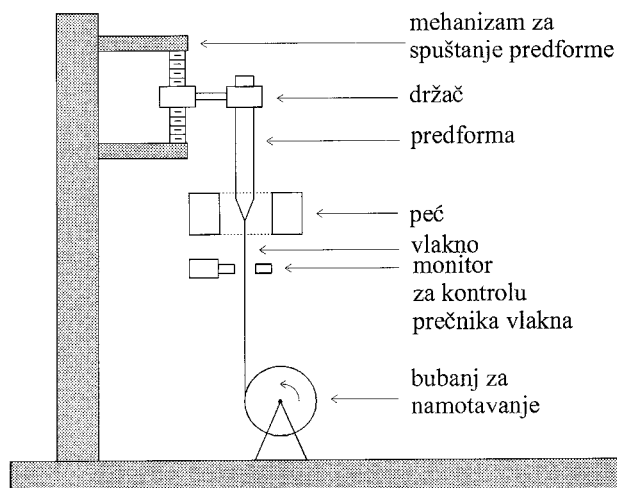
Za dobijanje polimernih optičkih vlakana koriste se tri osnovna postupka [2]: naslojavanje potapanjem, izvlačenje iz predforme i koekstruzija.

Naslojavanje potapanjem. Kod naslojavanja potapanjem, polimerno jezgro dobijeno ekstruzijom provlači se kroz rastvor polimera za naslojavanje, pri čemu rastvarač isparava a polimer za omotač se taloži na jezgrom. Neki od nedostataka ovog procesa su: a) isparavanje rastvarača iz kupke za naslojavanje utiče na promenu viskoznosti rastvora što dovodi do variranja debljine omotača; b) kontaminacija površine jezgra česticama prašine iz vazduha, pre naslojavanja, i sl., pri čemu postojanje statičkog naelektrisanja jezgra povećava kontaminaciju; c) da bi debljina omotača bila uniformna isparavanje rastvarača mora biti sporo, što utiče na proi-

zvodnost procesa; i d) korišćeni rastvarač mora biti kompatibilan sa jezgrom vlakna, što nije lako ostvariti s obzirom na ograničen broj polimera koji se koristi za optička vlakna [2].

Izvlačenje vlakana iz predforme. Izvlačenje POF iz predforme je slično postupku koji se koristi za dobijanje konvencionalnih staklenih optičkih vlakana; šematski dijagram izvlačenja vlakana iz predforme prikazan je na slici 6. Polimer u obliku cilindra, dobijen polimerizovanjem u masi, spušta se konstantnom brzinom kroz cevastu peć, pri čemu se vrh predforme topi omogućavajući tako da se vlakno izvuče iz nje. Omotač može da bude ili uključen u predformu ili da se nanosi simultano sa formiranjem vlakna, pri čemu oba polimera treba da imaju slične viskoznosti rastopa. Očvršćavanje strujnice rastopa se vrši hlađenjem u struji vazduha ili vode. Pored nedostataka kao što su otežana regulacija temperature izvlačenja i kontaminacija vlakna, ovaj postupak ima nekoliko izrazitih prednosti, posebno u istraživačkom radu, jer se može koristiti oprema koja se koristi za izradu konvencionalnih vlakana, a ovako dobijena vlakna imaju manje gubitke jer polimer nije dugotrajnije izložen dejstvu visokih temperatura i mehaničkih sila. S obzirom da se mogu proizvesti predforme sa kompleksnim profilima indeksa prelamanja ovaj postupak omogućava proizvodnju vlakana složenijih struktura [2,10,54]. Takođe, ovaj postupak se koristi za dobijanje POF sa dopiranim jezgrom [23,24,27,29,30].

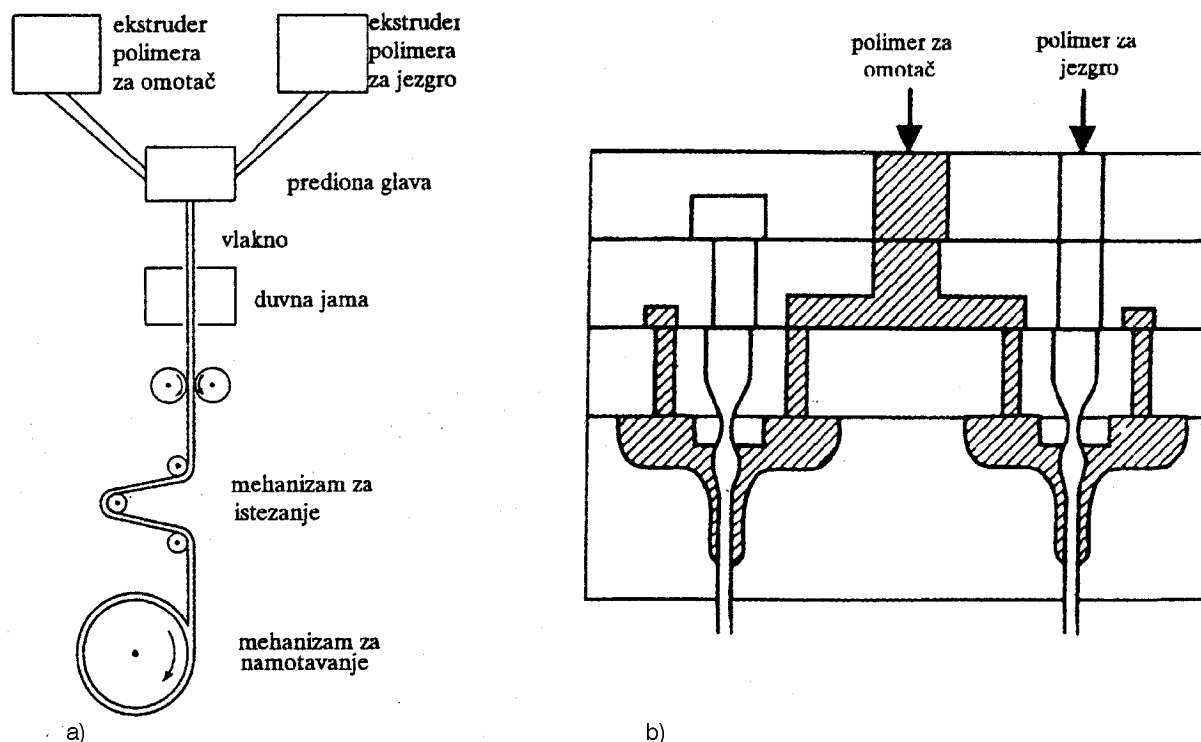
Koekstruzija. U suštini oblikovanje polimernih rastopa u dvokomponentna vlakna, tipa jezgro/omotač, ne



Slika 6. Izvlačenje POF iz predforme [10]

Figure 6. Preform-drawing process for POF production [10]

razlikuje se bitnije od ovog stadijuma proizvodnje jedno-komponentnih vlakana, ali su mnogo oštriji zahtevi u pogledu ravnomernosti zagrevanja polimera i njihove homogenosti, pripreme rastopa polimera, uslova tečenja rastopa i istežanja sveže formiranih vlakana [7,10,55], što su potvrdili i dali svoj prilog autori ovog rada u svojim istraživanjima [56-61]. Svaki od polimera se stapa i



Slika 7. a) Šematski prikaz procesa koekstruzije [2], b) Prediona glava za koekstruziju [7]

Figure 7. a) Schematic extrusion process for POF production [2], b) Spinning head for conjugate spinning [7]

homogenizuje u posebnom ekstruderu (slika 7a), podešenom prema vrsti polimera. Tečni polimer se uvodi u predionu glavu ili njen modul (slika 7b), koja se postavlja u predionu gredu uz uniformno zagrevanje, da bi se izbeglo jako smicanje rastopa koje izaziva pojavu raslojavanja strujnica različite viskoznosti. Prediona glava je specijalne konstrukcije i sadrži dve predioničke pumpe sa posebnim pogonom. Rastop se dovodi u predionički slog odozdo da bi se obezbedilo bolje zagrevanje. Formirana strujnica se zatim isteže, hladi i namotava.

Koekstruzionim procesom prevaziđeni su problemi vezani za dobijanje predformi ili kontaminaciju jezgra, mada treba obratiti pažnju na: upotrebu ekstrudera sa otvorom za degazaciju da bi se uklonile isparljive nečistoće, uključujući i neproreagovani monomer, izbegavanje dugog stajanja polimera u cevima i transportnim sredstvima, sprečavanje stvaranja nepoželjnih primesa u transportnim sredstvima, konstrukciju visokoravnomernih mlaznica za ispređanje, optimalnu viskoznost rastopa polimera za jezgro i omotač i nemešljivost njihovih rastopa. Sve ovo je neophodno da bi se dobila vlakna bez stranih primesa, homogene strukture, ravnomernog prečnika jezgra i dobro definisane granične površine jezgro-omotač, odnosno vlakna sa što manjim "spoljšnjim" gubicima [2, 7, 62].

Sam proces ekstruzije može biti kontinualan i periodičan. Mitsubishi Rayon je koristio proces kontinualne ekstruzije za proizvodnju "Eska" vlakna [10]. Najvažnija karakteristika ovog procesa je da se sa monomerom,

koji sadrži minimalne količine inicijatora i prenosioca rasta lanca, može kontinualno napajati reaktor, i istovremeno procesom koekstruzije proizvoditi naslojeno vlakno. Ovo je idealan komercijalan proces sa aspekta visoke proizvodnosti, ali nedostaci su mu pored složenosti i relativno velika količina kontakta polimera sa metalom, a samim tim i veliko smicanje rastopa polimera i njegova degradacija, što utiče na kvalitet dobijenog vlakna.

Nasuprot procesu kontinualne ekstruzije glavna prednost procesa periodične ekstruzije je njena jednostavnost, kako kontrole procesa tako i dizajna i izrade opreme. Periodičnost procesa potiče od toga što prvo imamo sintezu polimera, a zatim formiranje jezgra koje se odmah zatim naslojava. Upotrebom ovog procesa moguće je dobiti vlakna sa manjim slabljenjem (npr. 55dB/km pri 567nm za vlakno sa PMMA jezgrom u poređenju sa 125dB/km pri istoj talasnoj dužini za "Eska Extra"), jer je zahvaljujući relativno jednostavnoj aparaturi izbegnuta degradacija polimera karakteristična za "Mitsubishi" proces [10]. Pri formiranju vlakana sa PMMA jezgrom potrebno je, tokom finalnih etapa polimerizacije, obezbediti dovoljno visoku temperaturu, odnosno malu viskoznost reakcione smeše, kako bi se izbeglo lokalizovano ključanje usled samoubrzanja reakcije. Proces periodične ekstruzije zahteva da se polimerizacija izvede do kraja, što bitno ograničava proizvodnost procesa.

PRAVCI RAZVOJA POLIMERNIH OPTIČKIH VLAKANA

Glavni pravci razvoja polimernih optičkih vlakana usmereni su na istraživanje svojstava polimera koji nisu dovoljno iskorišćeni, zatim na poboljšanje njihove termopostojanosti koja, u do sada korišćenim POF, iznosi 80–90°C, na poboljšanje provođenja svetlosti (slabljenje komercijalnih POF je oko 200dB/km), kao i smanjenje apsorpcije svetlosti u njima [8–10,36,51,52,63]. Posebna pažnja se poklanja modifikovanju postupaka, modelovanju i optimizaciji procesa dobijanja POF [64–66].

POF sa malim gubicima. Apsorpcija svetlosti u POF, kao što je već pomenuto (slika 4), uslovljena je, u najvećem stepenu, C–H vibracijama i može se smanjiti zamenom H atoma u C–H vezi, nekim težim atomom. Kaino i saradnici [14,15,34,35,67] su to ostvarili zamenom H atoma, u PMMA i PS, deuterijumom. U slučaju PS to nije dalo tako dobre rezultate kao kod PMMA, jer vlakana sa jezgrom od PS imaju velike gubitke uslovljene nesavršenošću talasovodne strukture i Rayleigh–jevim rasipanjem. Kod vlakana sa PMMA jezgrom to je smanjilo gubitke na 20, 25 i 50dB/km pri talasnim dužinama od 660, 780 i 850nm, respektivno, i omogućilo prenos podataka na dužinu od preko 1.5km. Teorijska vrednost gubitaka za ova vlakna, prema Kaino–vim proračunima, usled nesavršenosti strukture talasovoda je 10dB/km pri $\lambda = 680\text{nm}$ [14,34,67]. Međutim, u slučaju ovih materijala problem predstavlja sorpcija vlage koja znatno povećava gubitke (prisustvo OH^- jona iz vode i vodene pare daje apsorpcione maksimume na talasnim dužinama od 950 i 725nm [6,17]). S tim u vezi, Kaino predlaže korišćenje polimera koji ima atome i deuterijuma i fluora kako bi se smanjili transmisioni gubici u bliskoj IC oblasti i eliminisali gubici usled sorpcije vlage [12,47]. No, kako je monomer, za sintezu ovih polimera, veoma specifičan i skup te nije još uvek komercijalno dostupan, kao kompromis svojstava i cene koriste se fluorovani polimeri.

Fluorovani polimeri pružaju sledeće prednosti: manje rasipanje svetlosti, poboljšanu transparentnost pri većim talasnim dužinama, manju sorpciju vlage, više temperature ostaklivanja, a time i povećanu termopostojanost. Slabljenje potpuno fluorovanog polimera određeno je Rayleigh–jevim rasipanjem. Manje rasipanje svetlosti posledica je činjenice da su gubici usled fluktuacije gustine proporcionalni n^8 , a gubici usled fluktuacije anizotropije n^4 i činjenice da fluorovani polimeri imaju manji indeks prelamanja. Međutim, potpuno fluorovanje polimera nije prihvatljivo sa aspekta sinteze, jer potpuno fluorovani monomeri ne polimerizuju dobro, a perhalogenovani polimer pokazuje visok stepen kristalnosti. Slabljenje postojećih fluorovanih PMMA polimera je 40–70dB/km [8,9,36,67]. Stoga, Kaino [34] predlaže korišćenje polihexafluorobutylmetakrilata kao materijala za jezgro POF, čije je slabljenje 19dB/km za $\lambda = 567\text{nm}$. Supstitucijom preostalih H–atoma deuterijumom dobija se materijal sa gubicima od 5–6dB/km ($\lambda = 680\text{nm}$), ali i

malim indeksom prelamanja ($n=1.32$) pa problem predstavlja izbor materijala za omotač, kao i neophodnost razvoja optičkog izvora koji će raditi u oblasti talasnih dužina primarnog prozora.

POF povećane termopostojanosti. Neke od oblasti primene POF podrazumevaju njihovo kraće ili duže izlaganje povišenim temperaturama, pa je stoga potrebno poboljšati njihovu termopostojanost. U slučaju kratkotrajnog izlaganja POF visokim temperaturama vlakno se može zaštititi upotrebom izolacionog omotača, dok primene koje podrazumevaju dugotrajnije izlaganje vlakana povišenim temperaturama (npr. u automobilskoj industriji zahteva se 1000 sati rada na 125°C) zahtevaju razvoj novih polimernih materijala povećane termopostojanosti. Temperatura eksploatacije POF ograničena je temperaturom T_g polimera i iznad te temperature dolazi do pogoršanja mehaničkih i optičkih svojstava vlakana. Pogoršanje mehaničkih svojstava povezano je sa omekšavanjem polimera i odvijanjem relaksacionih procesa na povišenoj temperaturi. Relaksacioni procesi su nepovratni i dovode do smanjenja mehaničkih karakteristika materijala, a kontrakcija vlakna, koja prati ovaj proces, može dovesti do migracije vlakna iz konektora. Sa povećanjem temperature eksploatacije dolazi do povećanja Rayleigh–jevog rasipanja, pri čemu je ova promena reverzibilna ukoliko nije praćena oksidacijom polimera [10].

POF sa jezgrom na bazi umreženih alkilmetakrilata i fluoroalkilmetakrilata poseduju dobru termopostojanost i deset puta manje slabljenje od vlakana sa PMMA jezgrom, na maksimalnoj radnoj temperaturi od 160°C [8–10].

POF sa širokim propusnim opsegom. Za uspešnu primenu POF u oblasti lokalnih mreža i optičkih komunikacija na kraćim rastojanjima pored malih gubitaka, koji su redukovani do skoro teorijskih vrednosti, veoma je važan kapacitet odnosno širina propusnog opsega POF. Tako, npr. komercijalno Mitsubishi Eska vlakno ($\text{NA}=0.5$, $n_1=1.49$) ima propusni opseg od 2.5MHz · km, što nažalost, nije dovoljno za transmisiju analogog video signala jer je neophodan propusni opseg od 6MHz · km, za grafiku visoke rezolucije zahteva se 10MHz · km, a za digitalni video signal 40MHz · km. POF sa širokim propusnim opsegom moguće je dobiti ili smanjenjem numeričke aperture vlakna ili proizvodnjom vlakana sa gradijentnom raspodelom indeksa prelamanja. Tako npr., smanjenje numeričke aperture Eska vlakna sa 0.5 na 0.25 dovodi do povećanja propusnog opsega na 10MHz · km [10].

Sva komercijalno dostupna polimerna optička vlakna su dvoslojna multimodna vlakna sa širinom propusnog opsega do 5MHz · km. S obzirom da će, u bliskoj budućnosti, čak i za optičke komunikacije na kraćim rastojanjima, kao i lokalne mreže, biti potrebni propusni opsezi od nekoliko stotina megaherca, Koike i saradnici [11,68–71] su proučavali mogućnost dobijanja gradijentnih polimernih optičkih vlakana na bazi kopolimera me-

tilmetakrilata i vinilfenilacetata ili vinilbenzoata. Dobijena vlakna su imala propusni opseg od 1GHz · km i slabljenje od 90dB/km ($\lambda = 572\text{nm}$). Upotreba PMMA-d8 za jezgro GI POF dovela je do povećanja propusnog opsega na 2GHz · km i smanjenja gubitaka na 56dB/km ($\lambda = 688\text{nm}$) [16,72].

Najnovija istraživanja [73–77] u oblasti POF sa malim gubicima i širokim propusnim opsezima vezana su za dobijanje GI POF sa dopiranim jezgrom, na bazi perfluorovanih (PF) amorfnih polimera i uz upotrebu dopanata relativno male molarne mase i većeg indeksa prelamanja, pri čemu dopant ne sadrži C–H veze. Velika prednost POF sa jezgrom na bazi PF polimera, u odnosu na PMMA i staklena optička vlakna, je mala disperzija materijala. Upotrebom odgovarajućih dopanta može se smanjiti zavisnost optimalnog profila indeksa prelamanja, a time i širine propusnog opsega, od talasne dužine. širina propusnog opsega ovih vlakana je 10GHz i 100GHz pri talasnim dužinama 0.85 μm i 1.3 μm , respektivno, sa gubicima 40dB/km ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$), dok je njihova teorijska vrednost 0.25dB/km ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$), odnosno 0.2dB/km ($\lambda = 1.5 \mu\text{m}$), što je uporedivo sa karakteristikama staklenih optičkih vlakana. Ovako veliko poboljšanje u oblasti slabljenja i širine propusnog opsega, kao i mogućnost primene pri većim talasnim dužinama ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$), obećava sjajnu budućnost za POF u oblasti telekomunikacija.

ISTRAŽIVANJA U OBLASTI POLIMERNIH OPTIČKIH VLAKANA U JUGOSLAVIJI

Poslednjih desetak godina, na Tehnološko–metalurškome fakultetu u Beogradu, sprovode se istraživanja u oblasti polimernih optičkih vlakana, a u kojima su, od pre par godina, uzeli učešće i istraživači Instituta FKS iz Jagodine [56–61,78–82]. Istraživanja su bila usmerena na dobijanje polimernih optičkih vlakana sa jezgrom od PC i PMMA i rezultirala su osvajanjem postupka dobijanja PC i PMMA vlakana u laboratorijskim uslovima rada. Osvojeni tehnološki parametri, u laboratorijskim uslovima rada, preneti su, kada je u pitanju PMMA, na industrijsko ekstruziono postrojenje. Dobijena PMMA vlakna, različitih prečnika (0.3–1mm) i koeficijentata varijacije prečnika od 0.7 do 10%, poseduju dobre mehaničke karakteristike (prekidna jačina 2.9–17.1cN/tex), vrednosti dvojnog prelamanja $1.8\text{--}8.8 \cdot 10^{-3}$ i transmisionne gubitke oko 20dB/m. S obzirom da se transmisionni gubici smanjuju sa smanjenjem dvojnog prelamanja, a da su ispitivanja PMMA vlakana pokazala da se sa povećanjem temperature optička anizotropija gubi u relativno širokom temperaturnom intervalu (90–110°C), određenim toplotnim obradama moglo bi se smanjiti dvojno prelamanje PMMA vlakana, što bi se pozitivno odrazilo na optička svojstva vlakana. Istovremeno sa eksperimentalnim istraživanjima radeno je i matematičko modelovanje i simulacija procesa formiranja PMMA vlakana u cilju optimizacije procesa formiranja vlakana i određivanja njegove osetljivosti na odstupanja tehnoloških parametara od njihovih nominalnih vrednosti.

Dobijeni jednodimenzioni matematički model procesa formiranja PMMA vlakana omogućava da se oceni oblast stabilnog formiranja vlakana projektovanih svojstava, ali ne omogućava da se u potpunosti oceni amplituda i frekvencija promene prečnika vlakna (za kriterijum optimizacije izabran je koeficijent varijacije prečnika) usled "rezonansa istežanja" ili kolebanja tehnoloških parametara. Iznadene kvantitativne zavisnosti između parametara procesa formiranja, strukture i svojstava dobijenih vlakana predstavljaju dobru osnovu za kompleksniju simulaciju i optimizaciju procesa formiranja vlakana uzimanjem u obzir radijalnog gradijenta temperature i brzine vlakna, kao i uvođenjem dodatnih promenljivih vezanih za strukturne karakteristike vlakna, što zajedno sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja može da posluži kao osnova za razvoj polimernih optičkih vlakana u našoj zemlji.

ZAKLJUČAK

Razvoj polimernih optičkih vlakana se nastavlja, pokazujući da nedostaci ovih vlakana u oblasti slabljenja, širine propusnog opsega i otpornosti na toplotu, nisu nepremostivi. Time se otvara put novoj generaciji polimernih optičkih vlakana visokih performansi. Nema sumnje da će povećano interesovanje na tržištu, koje će ova vlakna opravdati, stimulisati dalji napredak, kako u proizvodnji vlakana tako i u odgovarajućim tehnološkim sistemima, i na taj način omogućiti da polimerna optička vlakna ostvare svoj skriveni potencijal.

LITERATURA

- [1] T. Brodić, Svjetlovodne komunikacije, Svjetlost, Sarajevo, 1991, str.11–37.
- [2] B.N. Derick, Fiber Optics, in: Encyclopedia of Polymer Science and Technology, vol.15, Interscience publishers, John Wiley & Sons, New York, 1972, p.192–224.
- [3] K.C. Kao, G.A. Hockham, Proc.IEEE, **113(7)** (1966) 1151.
- [4] M.W. Jones, K.C. Kao, J.Sci.Instrum.(J.Phys.E), **2** (1969) 331.
- [5] A. Marincić, Osnovi optoelektronskih telekomunikacija, Građevinska knjiga, Beograd, 1986, str.4–7, 96–108, 133–161, 178–186, 231.
- [6] J.E. Midwinter, Optical Fibers for Transmission, John Wiley & Sons, New York, 1979, p.72–93, 106–127, 137–161.
- [7] K. Shimada, Spinning of Optical Fibers, in: Advanced Fiber Spinning Technology, Ed. T.Nakajima, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1994, p.208–224.
- [8] Y. Takezawa, S. Tanno, N. Taketani, S.Ohara, H.Asano, J.Appl.Polym.Sci., **42** (1991) 2811.
- [9] Y. Takezawa, S. Tanno, N. Taketani, S.Ohara, H.Asano, J.Appl.Polym.Sci., **42** (1991) 3195.
- [10] C. Emslie, J.Mater.Sci., **23** (1988) 2281.
- [11] Y. Koike, Y. Ohtsuka, Mat.Res.Soc.Symp.Proc (Opt.Fiber Mater.Process), **172** (1990) 247.
- [12] F. Ide, T. Yamamoto, Mat.Res.Soc.Symp.Proc.(Opt.Fiber Mater.Process), **172** (1990) 235.
- [13] T. Kaino, M. Fujiki, S. Nara, J.Appl.Phys., **52** (1981) 7061.
- [14] T. Kaino, K. Jinguji, S. Nara, Appl.Phys.Lett., **41** (1982) 802.
- [15] T. Kaino, K. Jinguji, S. Nara, Appl.Phys.Lett., **42** (1983) 567.
- [16] Y. Koike, T. Ishigure, E. Nihei, J. Lightwave Technol., **13** (1995) 1475.

- [17] I.I. Teumin, *Volnovody opticheskoi svyazi, Svyaz*, Moskva, 1978, str.8–40.
- [18] Kh.G. Unger, *Planarnye i volokonnye opticheskie volnovody*, Mir, Moskva, 1980, str.363–379, 483–565.
- [19] *Optical-Fiber Transmission*, Ed.E.E.Bert Basch, Howard W. Sams & Co., Indianapolis, 1987, p.10–22.
- [20] S. Geckeler, *Telcom Report (Spec. Issue "Optical Communications")*, **6** (1983) 9.
- [21] S.E. Miller, E.A.J. Marcatili, T. Li, *Proc.IEEE*, **61** (1973) 1703.
- [22] V.B. Veinberg, D.K. Sattarov, *Optika svetovodov, Mashinostroenie, Leningrad*, 1977.
- [23] D.W. Garvey, Q. Li, M.G. Kuzyk, C.W. Dirk, S. Martinez, *Optics Letters*, **21**(2) (1996) 104.
- [24] D.W. Garvey, K. Zimmerman, P. Young, J. Tostenrude, J.S. Townsend, Z. Zhou, M. Lobel, M. Dayton, R. Wittorf, M.G. Kuzyk, J. Sounick, C.W. Dirk, *J.Opt.Soc.Am.B.*, **13** (1996) 2017.
- [25] A.I. Zubkov, A.B. Ivanova, V.M. Levin, *Zh.Prikl.Spektrosk.*, **52** (1990) 859.
- [26] A.I. Zubkov, A.B. Ivanova, M.P. Pikkin, V.M. Levin, *Kvantovaya Elektron.*, **18** (1991) 771.
- [27] M.G. Kuzyk, U.C. Paek, C.W. Dirk, *Appl.Phys.Lett.*, **59** (1991) 902.
- [28] S. Muto, A. Fukasawa, T. Ogawa, M. Morisawa, H. Ito, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **29** (1990) 1023.
- [29] G.D. Peng, P.L. Chu, Z. Xiong, T. Whitbread, R.P.Chaplin, *Optics Communications*, **129** (1996) 353.
- [30] G.D. Peng, P.L. Chu, Z. Xiong, T. Whitbread, R.P. Chaplin, *J. Lightwave Technology*, **14** (1996) 2215.
- [31] P. Pierre, J. Farenc, P. Destruel, M. Lescure, *Rev.Sci.Instrum.*, **67** (1996) 579.
- [32] A. Marinčić, *Laseri i optoelektronika, Tehnička knjiga, Beograd*, 1987.
- [33] T. Li, *IEEE Transactions on Communication*, **COM-26** (1978) 946.
- [34] T. Kaino, *Jpn.J.Appl.Phys.*, **24** (1985) 1661.
- [35] T. Kaino, *J.Polym.Sci: Part A*, **25** (1987) 37.
- [36] W. Groh, D. Lupo, H. Sixl, *Angew.Chem.Adv.Mater.*, **101** (1989) 1580.
- [37] T.G. Giallorenzi, *Proc. IEEE*, **66**(7) (1978) 744.
- [38] K.C. Kao, G.A. Hockham, *Proc.IEE*, **113**(7) (1966) 1151.
- [39] S.E. Miller, E.A.J. Marcatili, T. Li, *Proc.IEEE*, **61**(12) (1973) 1703.
- [40] Y. Murakami, H. Tsuchiya, *IEEE J.Quantum Electronics*, **14**(7) (1978) 495.
- [41] Japanese Industrial Standard, *Test Methods for Structural Parameters of All Plastic Multimode Optical Fibers*, JIS C 6862, 1991.
- [42] A. Ohmori, *USP* 4,660,923, 28.04.1987.
- [43] J. Gaynor, G. Schueneman, P. Schuman, J.P. Harmon, *J.Appl.Polym.Sci.*, **50** (1993) 1645.
- [44] T. Koishi, I. Tanaka, T. Yasumura, Y. Nishikawa, *USP* 4,687,295, 18.08.1987.
- [45] A. Ohmori, N. Tomihashi, T. Kitahara, *USP* 4,720,428, 19.01.1988.
- [46] T. Matsumoto, Y. Uozu, *USP* 4,836,642, 06.01.1989.
- [47] T. Kaino, *Appl.Opt.*, **24** (1985) 4192.
- [48] R.S. Jovanović, *IV (Sintetizovana organska vlakna*, Edicija *Nauka o vlaknima i tehnologija vlakana*, Građevinska knjiga, Beograd, 1990, str.183–184.
- [49] G. Kampf, D. Freitag, W. Witt, *Angew.Makromol.Chem.*, **183** (1990) 243.
- [50] T. Yamashita, K. Kamada, *JPN.J.Appl.Phys.*, **A32**(6) (1993) 2681.
- [51] N. Taketani, S. Tanno, S. Ohara, H. Asano, T. Abe, *Kobunshi Ronbunshu*, **47**(2) (1990) 133.
- [52] T.A.C. Flipsen, R. Steendom, A.J. Pennings, G. Hadziioanou, *Adv.Mater.*, **8**(1) (1996) 45.
- [53] M. Lisitsa, L. I. Berezinskiy, M. Ya. Valakh, *Voloknistaya optika, Tekhnika, Kiev*, 1968.
- [54] H. Takahashi, T. Kanazawa, E. Ito, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, 50–54.
- [55] A. Zlabicki, *Fundamentals of Fibre Formation*, John Wiley & Sons, London, 1976, p.366–373.
- [56] M. Kostić, P. Škundrić, R. Aleksić, N. Vojković, B. Popović, A. Medović, V. Divjaković, *Zbornik radova "YU-Polimeri 98"*, Jagodina, maj.1998., s.97–100.
- [57] M. Kostić, P. Škundrić, N. Vojković, *Book of Abstracts 1st Int. Conf. of the Chem. Soc. of the South-East European Countries, Halkidiki, June 1998.*, Vol.II, PO661.
- [58] B. Popović, P. Škundrić, M. Kostić, R. Aleksić, R. Jančić, *Izvodi radova XXXVII Savetovanja SHD, Novi Sad, jun 1995*, s.291.
- [59] M. Kostić, P. Škundrić, R. Aleksić, N. Vojković, A. Medović, *Izvodi radova VI Savetovanja hemičara i tehnologa Republike Srpske, Banja Luka, novembar 1998.*, s.92.
- [60] M. Kostić, P. Škundrić, N. Vojković, A. Medović, *Proučavanje mogućnosti dobijanja polimetilmetakrilatnih vlakana specijalnih svojstava I, Hemijska vlakna*, **39**(1–4) (1999) u štampi.
- [61] M. Kostić, *Doktorska disertacija, TMF, Beograd*, 1998.
- [62] L. Dvoranek, L. Machova, M. Šorm, Z. Pelzbauer, J. Švanter, V. Kubanek, *Angew.Makromol.Chem.*, **174** (1990) 25.
- [63] R. Steele, *Laser Focus World*, Januar (1995) 33.
- [64] J.R. Bartoli, R.D. Mansano, P. Verdonck, M.N. Carreno, R.A. da Costa, S.C. de Castro, O.L.B. Matins, R. Leone Filho, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.59–66.
- [65] A. Baran, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.43–49.
- [66] F.G.H. van Duijnhoven, C.W.M. Bastiaansen, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.55–58.
- [67] W. Groh, *Makromol.Chem.*, **189** (1988) 2861.
- [68] Y. Koike, E. Nihei, N. Tanio, Y. Ohtsuka, *Appl.Opt.*, **29** (1990) 2686.
- [69] Y. Ohtsuka, E. Nihei, Y. Koike, *Appl.Phys.Lett.*, **57** (1990) 120.
- [70] T. Ishigure, E. Nihei, Y. Koike, *Appl.Opt.*, **33** (1994) 4261.
- [71] Y. Koike, E. Nihei, *Polym.Prepr.(Am.Chem.Soc.)*, **32**(3) (1991) 111.
- [72] I. Ishigure, A. Horibe, E. Nihei, Y. Koike, *J. Lightwave Technol.*, **13** (1995) 1686.
- [73] Y. Koike, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.1–8.
- [74] T. Kaneko, S. Kitamura, T. Ide, T. Kawase, T. Shimoda, Y. Watanabe, R. Yoshida, Y. Takano, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.27–32.
- [75] Q. Zhang, P. Wang, Y. Zhai, *J.Appl.Polym.Sci.*, **67** (1998) 1431.
- [76] T. Ishigure, E. Nihei, Y. Koike, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p. 33–38.
- [77] T. Onishi, H. Murofushi, Y. Watanabe, Y. Takano, R. Yoshida, M. Naritomi, *Proc.of 7th Int.Conf.POF '98, Berlin, October 1998*, p.39–42.
- [78] D. Stojanović, S. Jovanović, R. Aleksić, *Utjecaj uslova formiranja na ravnomernost prečnika poli(metilmetakrilatnih) vlakana*, IX Jugoslovenski kongres hemije i hemijske tehnologije, Herceg Novi, 1992.
- [79] R. Jančić, R. Aleksić, P. Škundrić, Š. Ušćumlić, M. Kostić, B. Popović, *Sbornik tezisev Mezhdunarodnaye konferentsiye "Matematicheskie metodi v khimii i khimicheskoi tehnologii"* MMH-9, 30.05.–02. 06.1995., Tver, Chast 4, st. 64.
- [80] R. Jančić, R. Aleksić, P. Škundrić, Š. Ušćumlić, M. Kostić, B. Popović, *Zhur. Vysokochistye Veshchestva*, **2** (1996) 90.
- [81] M. Kostić, P. Škundrić, B. Popović, A. Medović, R. Jovanović, *Hemijska vlakna*, **37**(1–4) (1997) 47.

[82] M. Kostić, P. Škundrić, N. Vojković, R. Aleksić, Š. Uščumlić, A. Medović, Summaries of 13th Int. Congress of Che-

mical and Process Engineering, Praha, August 1998., Vol.8, p.126.

SUMMARY

POLYMER OPTICAL FIBERS – TODAY

(Review paper)

Mirjana M. Kostić¹, Petar D. Škundrić¹, Nikola B. Vojković², Radoslav R. Aleksić¹
¹Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, ²Institute FKS, Jagodina

Polymer optical fibers (so called POF) are already in wide use in a large number of fields. This paper gives an overview including a background of the development of polymer optical fibers, their advantages, various types of fibers and applied materials. The physical principles of optical waveguides are also discussed. Manufacturing techniques and the properties of polymer optical fibers are described in detail. The poor market penetration of polymer optical fibers, due to inadequate performance in terms of attenuation, bandwidth and temperature resistance, is explained. The article concludes with a discussion of further development, especially in regard to the extension of the bandwidth, the reduction of losses and the improvement of heat resistance, indicating great promise for the development of a new generation of high-performance polymer optical fibers which will satisfy market demands. Based on such prospects, a future high-speed network is proposed.

Key words: polymer optical fiber • Fiber properties • Core material • Manufacturing technique • Development.

Ključne reči: polimerna optička vlakna • osobine • proizvodnja • razvoj.