

## DA LI ĆE PLASTIKA ZAMENITI BAKAR U KUĆNIM I LOKALNIM MREŽAMA?\*

### WILL THE PLASTIC REPLACE THE COPPER IN HOME AND LOCAL AREA NETWORKS?\*

Vujo Drndarević, Elektrotehnički fakultet, Beograd

**Sadržaj** - Novi komunikacioni servisi, kao što su Internet protokol TV i video na zahtev, pred kućne lokalne mreže i najisturenije segmente mreže za pristup postavljaju dodatne zahteve po pitanju brzine prenosa, raspoloživosti veza i kvaliteta prenosa. U ovom radu analizirane su karakteristike i mogućnosti primene plastičnih optičkih vlakana (*Plastic Optical Fiber, POF*) kao kvalitetene i ekonomične alternative standardno korišćenim žičnim komunikacionim medijumima ili relativno skupim staklenim optičkim vlaknima. Najnovija istraživanja pokazuju da se uz pomoć plastičnih optičkih vlakana mogu ostvariti brzine prenosa do 10 Gb/s na rastojanjima do 50 m i brzine prenosa do 1 Gb/s na rastojanjima do 300 m. Zahvaljujući brojnim dobrim karakteristikama i velikim potencijalima kojima POF vlakna raspolažu, može se očekivati da ona zauzmu centralno mesto u realizaciji mreža za pristup i kućnih lokalnih mreža nove generacije.

**Ključne reči:** *plastična optička vlakna, optički predajnici, optički prijemnici, mreže za pristup, kućne lokalne mreže*

**Abstract** - New communication services such as Internet Protocol TV (IPTV) and Video on Demand (VoD), place additional demands in front of the home area networks and very last part of communication networks in terms of transmission speed, link availability and quality of service (QoS). In this paper we analyze the characteristics and the possibilities of application of plastic optical fiber (POF) as a quality and cost-effective alternative to standard wired communications media or to even much more expensive glass optical technology. Latest research shows that by using plastic optical fiber the transfer rate of up to 10 Gb/s at distances up to 50 m and transmission up to 1 Gb/s at distances up to 300 m could be achieved. Thanks to the many good features and great potentials available, it can be expected that POF technology takes a main role in implementation of the new generation of access networks and home area networks.

**Key words:** *Plastic Optical Fiber (POF), Optical Transmitters, Optical Receivers, Access Network, Home Network*

### 1. UVOD

Razvoj mreža za pristup, najisturenijih segmenata ovih mreža (*edge network*) i kućnih lokalnih mreža primetno zaostaje u odnosu na razvoj ostalih elemenata savremenih komunikacionih sistema. Ako se ovakav trend nastavi sasvim je izvesno da će korisničke mreže postati usko grlo celog komunikacionog sistema. S druge strane, zahtevi za velikim brzinama prenosa, stalnom raspoloživošću veza i visokim kvalitetom prenosa predstavljaju ključne zahteve koji se postavljaju pred telekomunikacione operatere i provajdere koji žele da plasiraju svoje usluge na tržištu. Od telekomunikacionih operatere se zahteva i da korisnicima pruže nove servise, kao što su Internet protokol TV (*Internet Protocol TV, IPTV*), video na zahtev (*Video on Demand, VoD*) i dr., koje nije moguće ostvariti korišćenjem klasičnih xDSL veza [1]. Pored napred navedenih tehničkih zahteva, pred najisturenije segmente mreža za pristup postavljaju se još dva podjednako važna zahteva: niska cena i jednostavna izrada mrežne instalacije.

Korisničke mreže za pristup mogu se realizovati primenom bežičnih sistema, kablovskih veza ili kombinovanjem ovih tehnologija. Za realizaciju bežičnih komunikacionih sistema za pristup na raspolaganju stoje: bežične lokalne mreže (WLAN, IEEE 802.11), Bluetooth, GSM sistem mobilnih komunikacija, brzi HSPA (*High-Speed Packet Access*) protokol i najnovije LTE (*Long-Term Evolution*) tehnologije. Ove mreže obezbeđuju korisniku određeni stepen mobilnosti uz ograničenu i često promenljivu brzinu prenosa. Za realizaciju kablovskih mreža koriste se neoklopljene upredene parice (UTP), koaksijalni kablovi,

HomePNE linije, komunikacija preko elektroenergetskih vodova (*Power Line Communication, PLC*) i dr. Pri tome, primena UTP kablova već duži niz godina predstavlja najprisutnije rešenje u ovoj oblasti komunikacija. Međutim, imajući u vidu stalni trend rasta cene metala, posebno bakra, zatim osetljivost žičnih veza na elektromagnetne smetnje (*Electromagnetic Interference, EMI*), limitiran propusni opseg kao i zahtev da se komunikacioni kablovi ne postavljaju u iste kanale sa energetskim kablovima, žične veze ne predstavljaju najperspektivnije rešenje za kućne mrežne instalacije.

Zahteve za velikom brzinom prenosa i garantovanim kvalitetom servisa (QoS) u mrežama za pristup i kućnim lokalnim mrežama najlakše je ispuniti korišćenjem optičkih komunikacionih sistema. Korišćenjem optičkih vlakana obezbeđuje se potpuna imunost na elektromagnetne smetnje, a optički kablovi se mogu postavljati u postojeće kanale u kojima se nalaze elektroenergetski vodovi. U novije vreme čine se naponi da se usavrše plastična (polimerna) optička vlakna (*Plastic Optical Fiber, POF*) i prateće aktivne i pasivne optičke komponente i primene kao ekonomična i kvalitetna alternativa relativno skupim klasičnim optičkim tehnologijama [2-7].

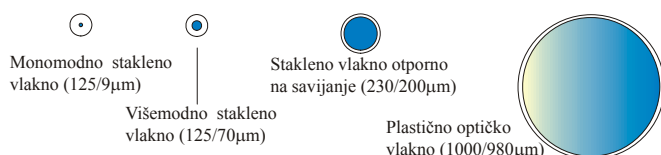
U ovom radu dat je pregled karakteristika i mogućnosti primene POF vlakana u realizaciji mreža za pristup i kućnih lokalnih mreža. Takođe, sumirane su prednosti primene POF vlakana, izvršena su poređenja optičkih i klasičnih tehnologija i izvučeni zaključci u vezi perspektive POF tehnologija kao dugoročnog rešenja problema povezivanja na kraćim i umerenim rastojanjima.

\*Rad realizovan u okviru projekta TR-11013 koji je finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj R. Srbije

## 2. KARAKTERISTIKE PLASTIČNIH OPTIČKIH VLAKANA

Optička vlakna sa jezgrom od silicijuma ili stakla već duži niz godina imaju ključnu ulogu u razvoju telekomunikacionih mreža koje se koriste za prenos na velikim i srednjim rastojanjima. Primetan je trend da se dobre karakteristike ove tehnologije primene i u komunikacijama na kratkim rastojanjima. Posebna pažnja se poklanja razvoju i primeni plastičnih optičkih vlakana koja za prenos na malim i umerenim rastojanjima predstavljaju ekonomičnu alternativu klasičnim optičkim vlaknima.

S obzirom da je elastičnost polimera višestruko veća od elastičnosti stakla, jezgro plastičnih optičkih vlakna po pravilu ima veliki prečnik, pri čemu je zadržana neophodna savitljivost. Za razliku od klasičnih staklenih optičkih vlakana kod kojih jezgro zauzima samo 1 % poprečnog preseka vlakna, kod POF vlakna jezgrom pripada preko 95 % preseka vlakna kroz koji se prenosi svetlosni signal (sl. 1.).



Slika 1. Poprečni presek različitih tipova optičkih vlakana

POF vlakana, kao što se vidi sa sl. 1., imaju prečnik reda 1000 µm, pri čemu je prečnik samog jezgra reda 980 µm. S obzirom da POF vlakno raspolaže ovako velikim prečnikom, ne zahteva se velika preciznost završetka vlakna, a prisustvo manjih nečistoća nema izrazito negativno dejstvo na performanse prenosnog sistema. Samim tim, od delova prenosnog sistema, kao što su npr. optički konetori, ne zahteva se veoma visoka preciznost, te i njihova cena nije visoka. Dopuštene tolerancije pri povezivanju POF vlakana daju mogućnost da instalaterske radove obavljaju i lica koja nisu usko specijalizovana za rad sa optičkim kablovima, koristeći jednostavne alate, što donosi dodatne uštede.

Za razliku od staklenih vlakana, kod kojih je teško postići veliku razliku indeksa prelamanja jezgra i omotača, što za posledicu ima relativno mali ugao prihvatanja koji ne prelazi 17°, kod POF vlakana moguće je ostvariti veliku razliku indeksa prelamanja jezgra i omotača. Tipična vrednost numeričke aperture POF vlakna je  $NA=0.5$ , što odgovara uglu prihvatanja od 30°. Velike vrednosti numeričke aperture i ugla prihvatanja olakšavaju spajanje izvora svetlosti sa POF vlaknima i smanjuju gubitke usled savijanja vlakna. Međutim, sa porastom ugla prihvatanja raste broj optičkih modova te usled disperzije dolazi do smanjenja propusnog opsega vlakna.

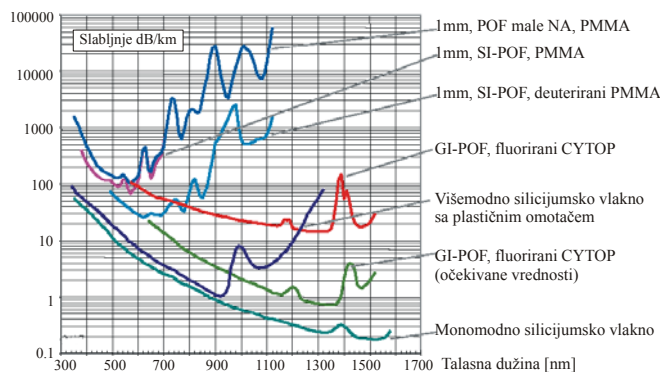
Za izradu POF vlakana koriste se poli-metil-metakrilat (*poly-methyl-methacrylate*, *PMMA*), polikarbonat (*polycarbonate*, *PC*) i polistireni (*polystyrene*, *PS*).

Prenos preko PMMA plastičnih optičkih vlakana vrši se u opsegu talasnih dužina od 520 nm do 780 nm, dakle u vidljivom spektru svetlosti. Za prenos se koriste signali u

određenim opsezima talasnih dužina (tzv. prozori) u kojima funkcija slabljenja vlakna ima lokalne minimume. Ovi minimumi se za PMMA vlakna nalaze na 530 nm, 570 nm i 650 nm. Slabljenje PMMA vlakna u posmatranom opsegu su relativno velika i iznose oko 80 dB/km na 570nm, odnosno 150 dB/km na 650nm. Polikarbonatna vlakna imaju nešto veće slabljenje od PMMA vlakana, ali su pogodnija za primenu u sredinama sa povišenom temperaturom, dok se polistirenom mogu postići nešto manja slabljenja u odnosu na PMMA vlakna.

U novije vreme za izradu jezgra POF vlakna koriste se deuterirani (*deuterated*, *d-PMMA*) i perfluorirani (*perfluorinated*, *PF*) polimeri, koji imaju manje slabljenje i veći propusni opseg od napred navedenih materijala. Slabljenje deuteriranih polimera povezano je sa samom tehnologijom izrade vlakna, ali je tipično za red veličine manje od slabljenja kod PMMA polimera, dok propusni opseg ovih vlakana ide do 10 GHz za rastojanja do 50 m. Vlakna izrađena od perfluoriranih polimera imaju manje slabljenje od vlakana čije je jezgro od deuteriranog polimera, ali je njihova izrada nešto složenija. Teorijski minimum slabljenja za vlakna izrađena od perfluoriranih polimera je ispod 0.2 dB/km, međutim ove vrednosti u praksi još uvek nisu dostignute [8].

Do sada su najbolji rezultati po pitanju slabljenja vlakna postignuti sa materijalom CYTOP (*Cyclic Transparent Optical Plymer*) sa kojim je ostvareno slabljenje reda 10 dB/km na talasnim dužinama od 1300nm. Može se očekivati da će vlakna od materijala CYTOP imati slabljenje manje od 1 dB/km. Na sl. 2. prikazana je zavisnost slabljenja od talasne dužine kod različitih vrsta plastičnih vlakana i za klasično silicijumsko vlakno [9].



Slika 2. Spektar slabljenja različitih optičkih vlakana

POF vlakna, kao i klasična optička vlakna, mogu imati stepenast profil indeksa prelamanja (*step index*, *SI*) ili gradijentni profil indeksa prelamanja (*graded index*, *GI*). Za razliku od SI-POF vlakana kod kojih se indeks prelamanja jezgra ne menja, kod GI-POF vlakana indeks prelamanja postepeno raste idući od omotača ka sredini jezgra. POF vlakna sa gradijentnim profilom indeksa prelamanja imaju nekoliko puta veći propusni opseg od POF vlakana sa stepenastim profilom indeksa prelamanja. Pogodnim izborom oblika profila kod ovih vlakana postižu se vrednosti

proizvoda propusnog opsega i rastojanja do  $2 \text{ GHz} \cdot 100 \text{ m}$ , pri  $\text{NA}=0.2$ .

U novije vreme na tržištu su prisutna vlakna sa višestepenim indeksom prelamanja. Prenos kroz ova vlakna odvija se kombinovanjem principa prenosa koji su zastupljeni kod dva prethodno pomenuta tipa vlakana, čime se povećanje propusnog opsega ostvaruje tehnološki relativno jednostavnim postupkom. Kod POF vlakana sa višestepenim indeksom prelamanja postižu se vrednosti proizvoda propusnog opsega i rastojanja od  $500 \text{ MHz} \cdot 100 \text{ m}$ , pri  $\text{NA}=0.3$ .

Prema postojećem standardu IEC 60793-2-40, POF vlakna su podeljena u osam klasa [10]. Klase A4a do A4c odnose se na SI-POF tipa PMMA. Vlakna ovog tipa koja imaju prečnik 1 mm najčešće se koriste u automobilskim komunikacionim instalacijama, sistemima automatskog upravljanja i u kućnim mrežama (IEEE 1394 i brzi Ethernet). Klasa A4d obuhvata SI-POF vlakna sa smanjenom numeričkom aperturom (0.30 ili 0.25) koja imaju veliki radijus savijanja (od 50 do 70 mm), što ih čini nepodesnim za mnoge primene. Zanimljivo je pomenuti da standard ne tretira odvojeno vlakna za komunikacije, već se ona opisuju zajedno sa vlaknima za osvetljenje i senzorske primene.

### 3. KOMPONENTE KOMUNIKACIONIH SISTEMA SA POF VLAKNIMA

Komunikacioni sistemi na bazi POF tehnologija pored optičkog vlakna sadrže i druge pasivne i aktivne optičke komponente. U pasivne komponente spadaju konektori, kapleri, filtri, mikseri i atenuatori, dok su aktivne komponente sistema izvori svetlosti, prijemnici i primopredajnici. U nastavku će biti iznete osnovne karakteristike predajnika, prijemnika i konektora pogodnih za primenu sa POF vlaknima.

Optički primopredajnici za POF vlakna grade se skoro isključivo na bazi poluprovodničkih dioda. Razlozi za to su male dimenzije (ispod  $1 \text{ mm}^3$ ), velike brzine rada (nekoliko ns do 0.1 ns), visoka efikasnost (preko 50 %), širok opseg talasnih dužina (200 nm do  $10^4 \text{ nm}$ ), uzak spektralni opseg, mala površina i mali ugao emitovanog zračenja, velika pouzdanost i niska cena.

Kao izvori svetlosti za prenos preko plastičnih optičkih vlakana najčešće se koriste svetleće diode (*Light Emitting Diode, LED*), laserske diode (*Laser Diode, LD*) i, u novije vreme, VCSEL laserske diode (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*). LED diode predstavljaju najstariju i najjednostavniju poluprovodničku strukturu koja emituje svetlost. Interna efikasnost LED diode prelazi 50% ali, zbog velikog rasipanja svetlosti, eksterna efikasnost je ispod 10 %. Laserska dioda ima istu strukturu kao i LED dioda, međutim, zbog stimulisanog zračenja, efikasnost joj je mnogo veća od efikasnosti LED diode. Talasna dužina emitovane svetlosti određena je karakteristikama poluprovodničkog materijala i rezonatora. Za razliku od LED dioda, koje emituju nekoherentnu svetlost čija se talasna dužina nalazi u opsegu

od oko 10 nm, kod laserskih dioda ovaj opseg je znatno uži i ne prelazi nekoliko nm.

VCSEL laserske diode su posebno pogodne za primenu sa POF vlaknima. Pored velike efikasnosti, VCSEL diode imaju i do 3 puta manju temperaturnu zavisnost talasne dužine svetlosti nego LED diode. VCSEL diode svetlost emituju upravno na strukturu diode, što olakšava povezivanje sa vlaknom. Struja praga VCSEL dioda je mala, što omogućuje rad i pri vrlo malim snagama. Svetlost koju emituje VCSEL diode nalazi se u vrlo uskom opsegu talasnih dužina a ugao emitovanog zračenja je mali, što predstavlja posebnu pogodnost kada se dioda povezuje sa vlaknom. Na tržištu su prisutne VCSEL diode velike snaga za talasne dužine od 780 nm do 850 nm koje omogućuju prenos i pri brzinama do 12 Gb/s. One mogu raditi i na temperaturama do 125 °C.

LED diode sa rezonantnom šupljinom (*Resonant Cavity LED*), koje predstavljaju noviji proizvod na tržištu, imaju sličnu strukturu kao VCSEL diode. Kod ovih dioda nije izražena struja praga, što pojednostavljuje pobudu. Spektar svetlosti koju emituje RC-LED je širi od spektra VCSEL dioda, a efikasnost ovih dioda ne prelazi nekoliko procenata ako se ne koristi sočivo za fokusiranje svetlosnog snopa. RC-LED diode omogućuju prenos pri brzini do 100 Mb/s.

Na kraju, pomenućemo i LED diode bez rezonantne šupljine (*Near Resonant Cavity LED - NRC LED*), kod kojih ne dolazi do stimulisanog zračenja. Zahvaljujući specijalnoj obradi površine preko koje svetlost napušta diodu, ostvaruje se ugao zračenja manji od  $17^\circ$  uz efikasnost koja prelazi 50%.

Pri izboru izvora svetlosti za POF sisteme posebno treba imati u vidu osnovne zahteve koji se odnose na jednostavnost izrade komunikacione mreže i nisku cenu investicije. Iz tih razloga, kao izvori svetlosti posebno su atraktivne LED diode koje se standardno koriste za osvetljenje i laserske diode koje se široko primenjuju kao izvori svetlosti kod svetlosnih pointera i čitača bar kodova. Ove komponente, zahvaljujući masovnoj proizvodnji, imaju veoma nisku cenu. LED diode se koriste za prenos preko PMMA vlakana na talasnim dužinama 530 nm, 570 nm ili 650 nm, a brzine prenosa idu do 250 Mb/s. Primenom laserskih dioda brzine prenosa se mogu povećati do 4 Gb/s. VCSEL laserske diode se koriste za prenos preko PMMA vlakana na 650 nm pri brzinama koje tipično iznose 1.2 Gb/s.

Za prenos preko perfluoriranih optičkih vlakana na talasnim dužinama od 650 nm koriste se isti izvori svetlosti kao i kod PMMA vlakana, dok se za prenos na talasnim dužinama 850 nm i 1300 nm primenjuju laserske diode, kao i kod klasičnih staklenih vlakana.

Za konverziju optičkog u električni signal na prijemu komunikacionog sistema koriste se fotodiode. Najvažnije karakteristike fotodioda su osetljivost i brzina. S obzirom da je energija fotona svetlosti data izrazom:

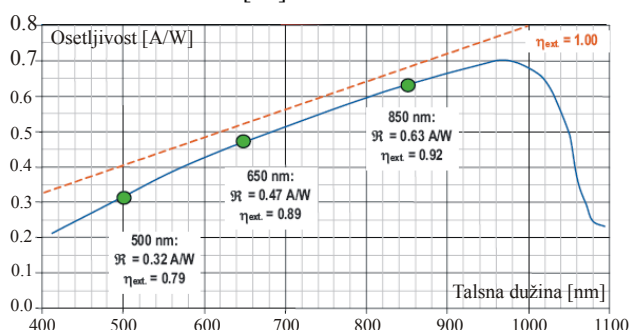
$$E=hc/\lambda, \quad (1)$$

( $h$  – Plankova konstanta,  $c$  – brzina prostiranja svetlosti a  $\lambda$  – talasna dužina), dolazi se do podatka da pri talasnoj dužini od  $1.24 \mu\text{m}$  foton ima energiju 1 eV. Struja fotodioda data je sledećim izrazom:

$$I_{FD}[A] = P_{opt} \eta_{ext} \lambda / 1.24 (\mu m), \quad (2)$$

pri čemu je  $P_{opt}$  optička snaga svetlosnog signala a  $\eta_{ext}$  eksterna efikasnost fotodiode.

Kao što se vidi iz izraza (2) manjoj talasnoj dužini svetlosti odgovara manja struja fotodiode pri određenoj optičkoj snazi signala. S druge strane, LED diode koje rade na manjim talasnim dužinama emituju veću optičku snagu od onih koje rade na većim talasnim dužinama, uz pretpostavku da im je efikasnost ista. Na osnovu ove analize može se zaključiti da su pobudna struja LED diode i struja fotodiode u relaciji koja praktično ne zavisi od talasne dužine svetlosti. Na sl. 3. prikazana je zavisnost odziva tipične fotodiode od talasne dužine svetlosti [11].



Slika 3. Zavisnost osetljivosti tipične Si-PIN fotodiode od talasne dužine svetlosti

Kao što se vidi sa sl. 3., osetljivost diode je najveća na talasnim dužinama u okolini 950 nm. S druge strane, kvantna efikasnost diode ne pada ispod 90 % i na manjim talasnim dužinama, sve do 650 nm. Na talasnim dužinama preko 1000 nm energija fotona se smanjuje i efikasnost diode rapidno opada.

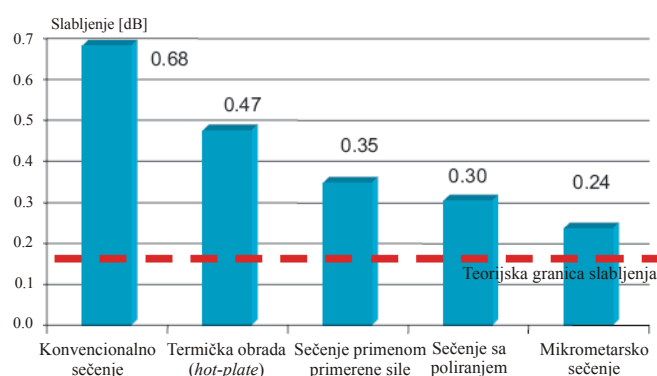
U sistemima sa POF vlaknima kao prijemnici se koriste sledeće fotodiode: PIN fotodiode, avelanz fotodiode (*Avalanche Photodiode, APD*) i metal-poluprovodnik-metal fotodiode (*Metal-Semiconductor-Metal Photodiode, MSM PD*). PIN fotodiode imaju najnižu cenu, jednostavne su za povezivanje, te je i njihova primena najčešća. S obzirom da imaju veoma malu kapacitivnost, MSM fotodiode imaju veliku brzinu rada odnosno širok propusni opseg (30 GHz) ali one, zbog visoke cene, još uvek ne nalaze širu primenu u POF sistemima.

Pored zasebnih predajnika i prijemnika, na tržištu je prisutan veliki izbor integrisanih optičkih primopredajnika (*Fiber Optic Transceiver - FOT*). Oni se koriste za konverziju signala u opsegu od nekoliko desetina Mb/s do 1.25 Gb/s. Integrisani primopredajnici sadrže sve neophodne elemente u jednom kućištu: izvor svetlosti, drajvere, pojačavače i fotodetektor. S obzirom da se veza izvora svetlosti i vlakna ostvaruje jednostavno, moguće je i izvor svetlosti i prateću elektroniku smestiti u kućište samog konektora [12].

Značajna prednost POF vlakana u odnosu na druge komunikacione medijume upravo se odnosi na mogućnosti jednostavnog povezivanja. Za povezivanje plastičnih optičkih

vlakana koriste se odgovarajući konektori i kapleri. Imajući u vidu činjenicu da su POF vlakna mnogo deblja od staklenih, konektori za POF vlakna su jednostavniji pa samim tim i jeftiniji od konektora za staklena vlakna. U isto vreme, konektori za POF vlakna manje su osetljivi na oštećenja, uzdužna i poprečna smicanja, ugaonu nepodešenost i zaprljanost.

Mehanička stabilnost konektora povezana je sa samom konstrukcijom, koja može biti metalna ili plastična. I u jednoj i u drugoj varijanti nude se konektori za simpleks i dupleks vezu. Najvažnija karakteristika konektora svakako je slabljenje. Slabljenje konektora usko je povezano sa obradom kraja vlakna (sl. 4.)

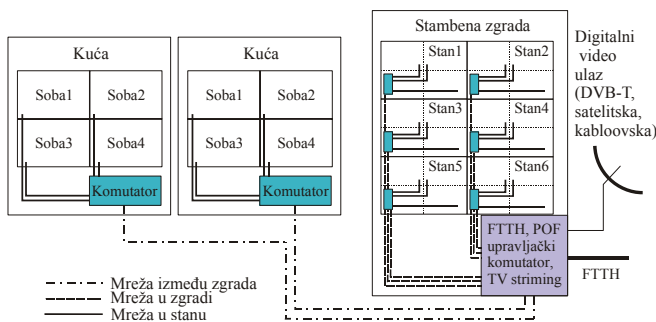


Slika 4. Slabljenje koje unosi konektor pri različitim procedurama obrade POF vlakna

Usavršenim postupcima obrade kraja vlakna moguće je, što pokazuju rezultati sa sl. 4., značajno redukovati slabljenje koje unosi konektor. Pri tome, teorijska granica slabljenja iznosi 0.17 dB i određena je Fresnelovom refleksijom [13].

#### 4. PRIMENA PLASTIČNIH OPTIČKIH VLAKANA

Najistureniji segmenti mreže za pristup (*edge network*) zbog svoje kapilarne strukture predstavlja nejskuplji deo mreže za pristup. Oni obuhvataju mrežu između stambenih zgrada, mrežu unutar same zgrade i kućne lokalne mreže (sl. 5.). Potrebno je naglasiti da kod nas, po pravilu, mreže između stambenih zgrada i unutar samih zgrada realizuju telekomunikacioni operateri, dok mreže u stanovima izvode sami korisnici. Ovu činjenicu treba imati u vidu pri izboru tehnologije na kojoj se baziraju rešenja pojedinih segmenata mreže.



Slika 5. Struktura najisturenijih segmenata mreže za pristup

Primena optičkih komunikacija, posebno na bazi POF tehnologija, prepoznaje se kao najizglednija mogućnost za dugoročno rešenje problema mreža za pristup [14]. Kada se razmatra mogućnost primene POF vlakana za prenos na umerenim rastojanjima, treba imati u vidu da propusni opseg standardnih SI-POF vlakana dužine 100 m iznosi oko 50 MHz, što dopušta prenos pri brzinama do 100 Mb/s u osnovnom opsegu bez povratka na nulu (*Non-Return-to-Zero, NRZ*). Međutim, zbog jake disperzije u POF vlaknu propusni opseg ne prelazi 15 MHz za dužine vlakna od 300 m.

Da bi se omogućio prenos pri brzinama od 100 Mb/s na rastojanjima većim od 200 m neophodno je pribеći usavršenim modulacionim postupcima, kao što je višenivovska impulsna amplitudska modulacija (*Multi-level PAM*). Primenom 8-PAM modulacije već je realizovan sistem na nivou prototipa koji omogućuje prenos bez greške na rastojanjima do 200 m preko standardnih SI-POF vlakana [2]. Takođe, vršene su analize mogućnosti primene modulacije sa više nosilaca (*Multi-Carrier Modulation, MCM*), koja se naziva i DMT modulacija (*Discrete Multitone, DMT*). Ovaj metod prenosa preko SI-POF predložen je u radu [15]. Preko prototipskog sistema demonstrirane su mogućnosti prenosa bez greške na rastojanjima do 200 m pri brzinama od 100 Mb/s uz kašnjenje od oko 1.1 ms.

U novije vreme na tržištu su prisutna GI-POF vlakna koja se, zahvaljujući smanjenoj modalnoj disperziji kao posledica gradijentnog koeficijenta refleksije jezgra, mogu koristiti za prenos u Gb/s opsegu primenom jednostavnog binarnog NRZ koda [8]. Međutim, ovde se problem sa medijuma za prenos seli u oblast optoelektronskih komponenti. Na predaji se mora koristiti veoma brz izvor svetlosti talasne dužine 650 nm. S druge strane, na prijemu se mora koristiti prijemnik velike efikasne površine reda 1 mm<sup>2</sup>. Oba ova zahteva nisu se javljala kod klasičnih optičkih sistema prenosa te je neophodno, paralelno sa razvojem POF vlakana vršiti razvoj odgovarajućih optoelektronskih komponenti: izvora svetlosti, fotodioda i odgovarajućih interfejsnih kola.

## 5. ZAKLJUČAK

Novi komunikacioni servisi i sve zahtevniji korisnički uređaji postavljaju pred mreže za pristup i kućne lokalne mreže sve veće zahteve u pogledu brzine prenosa. I pored

stalnog usavršavanja standardno korišćenih UTP bakarnih parice (Cat3-Cat7) one imaju nekoliko nedostataka: limitiran propusni opseg, osetljivost spojeva i visoki zahteve u pogledu kvaliteta konektora, osetljivost na elektromagnetne smetnje i dr. Ako se ovim tehničkim pitanjima dodaju i ekonomska, koja se odnose na trend rasta cene bakra i cene izrade mrežne instalacije, onda se dugoročna perspektiva ove tehnologije može dovesti u pitanje.

Najnovija istraživanja u oblasti tehnologije i primene POF vlakana, čiji rezultati su prikazana i u ovom radu, ukazuju na činjenicu da se na POF vlakana može gledati kao na perspektivnu alternativu bakarnim paricama u prenosu podataka na malim i umerenim rastojanjima. Već demonstrirane mogućnosti prenosa pri brzinama od 10 Gb/s na rastojanju od 100 m čine POF vlakna kompatibilnim sa najnovijim zahtevima Gigabit Ethernet standarda.

Pored širokog propusnog opsega, važne prednosti POF tehnologije u odnosu na druga kablovska rešenja mreža za pristup i kućnih lokalnih mreža odnose se na jednostavnost izrade instalacije, kabl ima mali prečnik, malu težinu, fleksibilan je, potpuno je imun na EMI, otporan je na vlagu, koroziju i prašinu. Rad sa POF vlaknima je potpuno bezbedan, za prenos se može koristiti svetlosni signal u vidljivom spektru koji je bezopasan za vid, a provera veza je izuzetno jednostavna pošto je signal vidljiv i golim okom. Napred navedene karakteristike za posledicu imaju stalni rast primene POF vlakana, koji se odvija po godišnjoj stopi od 20% [16].

Međutim, da bi POF vlakna zauzela centralno mesto u mrežama za pristup i kućnim lokalnim mrežama najnovije generacije potreban je dalji rad na: usavršavanje optoelektronskih komponenti primopredajnika za rad pri brzinama od nekoliko Gb/s uz poboljšanje linearnosti, propusnog opsega i pouzdanosti; razvoj lasera i fotodioda za montažnim pločicama pogodnih za višezilne POF kablove; razvoj višezilnih (*ribbon*) POF kablova; razvoj za rukovanje i instalisanje veoma jednostavnih konektora i kablova, čime bi se obezbedila niska cena instalisanja i pružila mogućnost za izradu instalacije po principu uradi sam; proširenje propusnog opsega primenom novih tehnologija i usavršenih modulacionih postupaka.

Na kraju, treba istaći da šira primena optičkih vlakana u realizaciji mreža za pristup i kućnih lokalnih mreža ne isključuje buduću primenu bežičnih tehnologija u ovim segmentima komunikacionog sistema. Bežični prenos, koji se odvija pri brzinama reda 100 Mb/s, ostaje prisutan unutar objekata korisnika, ali se podrazumeva da kičmu ovog sistema čini optička kablovska struktura koja dozvoljava prenos pri brzinama od nekoliko Gb/s.

## LITERATURA

- [1] Gaudino R. et al., "Status and Recent Results from the POF-ALL EU Project: Toward Improved Capacity and New Application of Large-Core POF", *Proceedings of Int. Conf. on POF*, pp. 79-84, Turin, Italy, 2007.

- [2] Möllers I., et al., "Plastic Optical Fiber Technology for Reliable Home Networking: Overview and Results of the EU Project POF-ALL", *IEEE Communications Magazine*, pp. 58-68, 2009.
- [3] Ton Koonen, et al. "In-House Networks Using Multimode Polymer Optical Fiber for Broadband Wireless Services", *Photonic Network Communication*, pp. 177-187, 2003.
- [4] A.M.J. Koonen, et al. "POF Application in Home Systems and Local Systems", available at <http://www.tue.nl>
- [5] V. Drndarević, N. Jevtić, "Primena Plastičnih optičkih vlakana u mrežama za pristup nove generacije", *Zbornik radova XXII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju POSTEL 2009*, Beograd, str. 287-304, 2009.
- [6] J. Marcou, editor, *Plastic Optical Fibres - Practical Applications*, Club des Fibres Optiques Plastiques (CFOP) France, John Wiley & Sons, Masson, 1997.
- [7] B. Lücke: „Fast Ethernet POF Components with Bare-Fiber Adapter for IPTV and Home Networking“, *21. Meeting of the ITG-SC 5.4.1*, Oldenburg, 2006.
- [8] O. Ziemann et al., *POF-Handbook — Optical Short Range Transmission Systems*, Springer, 2008.
- [9] Nico Gérard Harbach, "Fiber Bragg Gratings in Polymer Optical Fibers", doktorska disertacija, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švajcarska, 2008, available at <http://www.library.epfl.ch/theses>
- [10] IEC 60793-2-40, available at <http://www.iec.ch>
- [11] Union Optronics Corp., 650nm Red Laser Diode SLD-650-P10-RG-05, <http://www.uocnet.com>.
- [12] APAC Opto, <http://www.apacoe.com.tw>
- [13] D. Moll, H. Poisel: „Polymer Optical Fiber Termination - A Never Ending Story“, *Proceedings of International Conference on Polymer Optical Fiber POF'2000*, Boston, 2000.
- [14] Gaudino R. et al., "Future Internet in Home Networks: Towards Optical Solutions?," chapter in *Towards the Future Internet*, G. Tselentis et al., Eds., IOS Press, 2009, pp. 160–72.
- [15] R. Gaudino et al., "On the ultimate Capacity of SI-POF Links and the Use of OFDM: Recent result from the POF\_ALL Project", 16<sup>th</sup> Int'l Conf. Polymer Optical Fiber, Turin, Italy, Sept. 2007.
- [16] Paul Polishuk, Plastic Optical Fibers Branch Out, The Industrial Physicist, <http://www.pofto.com>
- [17] Cai Bo, Ji Xiao-li, Zhang Chao-can, "The Characteristics and Application of Polymer Optical Fiber", *Journal of Wuhan University of Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 41-43, 2003.
- [18] Luceat, *POF Seminar*, Kista, Italy, 2008, available at [www.acreo.com](http://www.acreo.com)