

Manzoni, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:432061>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

DOMAGOJ MANZONI

POF - PLASTIČNE SVJETLOVODNE NITI

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

POF - PLASTIČNE SVJETLOVODNE NITI

POF – PLASTIC OPTICAL FIBER

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Optoelektronički sustavi

Mentor: izv. prof. dr. sc. Irena Jurdana

Komentor: dr. sc. Nikola Lopac

Student: Domagoj Manzoni

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065609

Rijeka, 2022.

Student - autor : Domagoj Manzoni

Domagoj Manzoni

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065609

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom

POF - PLASTIČNE SVJETLOVODNE NITI

izradio samostalno pod mentorstvom - izv. prof. dr. sc. Irene Jurdane

te komentorstvom - dr. sc. Nikole Lopca

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student:

Domagoj Manzoni

Ime i prezime studenta: Domagoj Manzoni

Student: Domagoj Manzoni

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065609

IZJAVA STUDENTA – AUTORA O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor : Domagoj Manzoni

Domagoj Manzoni

SAŽETAK

U ovom radu opisana su plastična optička vlakna kao nova tehnologija i budućnost optičkih vlakana. Uporaba plastičnih optičkih vlakana i kabela sve je rasprostranjenija u raznim područjima. Vlakna se koriste u pomorstvu za komunikaciju na brodu, senzoricima, automobilske industriji, medicini, zrakoplovstvu, kućama i drugdje. Plastična vlakna su jeftinija za izradu i fleksibilnija u odnosu na staklena optička vlakna. U radu je opisana povijest POF-a i usporedba plastične i silicijeve niti. Navedeni su gubici prijenosa i prijenosni kapacitet. Opisani su materijali od kojih je napravljeno plastično optičko vlakno. Objasnjene su vrste vlakana, opisane su tehnike izrade POF-a i prikazane mjerne metode i mjerni instrumenti. Kabeli s optičkim nitima su podijeljeni na strukturu i na vrste kabela. Nakon analize prikazana je i primjena plastičnih vlakana i kabela kako u pomorstvu tako i u drugim industrijama.

Ključne riječi: POF, plastic optical fiber, optical fiber, maritime, POF cable

SUMMARY

In this paper, plastic optical fibers are described as a new technology and the future of optical fibers. The use of plastic optical fibers and cables is increasingly widespread in various areas. Fiber is used in maritime communications for ships, sensors, automotive, medicine, aviation, homes and elsewhere. Plastic fibers are cheaper to manufacture and more flexible than glass optical fibers. The paper describes history of POF and the comparison of tables. Transmission losses and transmission capacity are listed. The materials from which the plastic optical fiber is made are described. Types of fibers are explained, POF production techniques are described, and measuring methods and measuring instruments are presented. Fiber optic cables are divided into structure and cable types. After the analysis, the application of plastic fibers and cables in both maritime and other industries is presented.

Keywords : POF, plastic optical fiber, optical fiber, maritime, POF cable

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	2
1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
1.3. STRUKTURA RADA.....	2
2. POF – PLASTIC OPTICAL FIBER	3
2.1. POVIJEST	5
2.2. GUBICI PRIJENOSA	7
2.2.1. Gubitak apsorcije.....	7
2.2.2. Rayleighovo raspršenje.....	8
2.2.3. Plastične optičke niti s malim gubicima	9
2.2.3.1. Plastične optičke niti na bazi PMMA.....	9
2.2.3.2. Plastične optičke niti na bazi CYTOP.....	10
2.3. PRIJENOSNI KAPACITET.....	11
2.3.1. Širina pojasa (<i>Bandwith</i>).....	11
2.3.1.1. Intermodalna disperzija	12
2.3.1.2. Intramodalna disperzija.....	12
2.3.1.3. Plastične optičke niti velike propusnosti.....	13
2.3.2. Širenje valova kod plastičnih optičkih niti.....	14
2.4. MATERIJALI.....	15
2.4.1. PMMA (<i>polymethylmethacrylate</i>).....	16
2.4.2. CYTOP.....	18

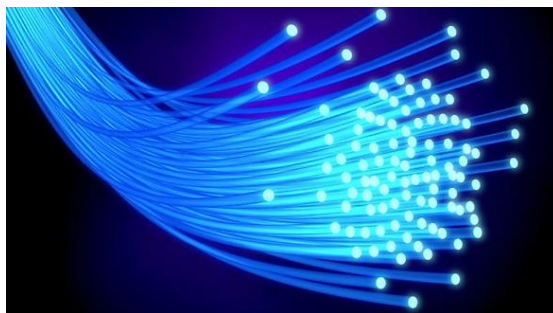
2.5. VRSTE POF VLAKANA	19
2.5.1. <i>Step Index POF</i>	20
2.5.2. <i>Graded index POF</i>	21
2.6. TEHNIKE IZRADE POF-A.....	22
2.6.1. Metoda izvlačenja predforme	22
2.6.2. <i>Skupna ekstruzija</i>	24
2.6.3. <i>Kontinuirana ekstruzija</i>	25
2.7. MJERNE METODE	26
2.7.1. <i>Profil indeksa loma</i>	26
2.7.2. <i>Uvjet za lansiranje</i>	26
2.7.3. <i>Atenuacija</i>	27
2.7.3.1. <i>Cutback tehnika</i>	28
2.7.4. <i>Bandwith - širina pojasa</i>	29
2.7.4.1. <i>Mjerenje propusnosti u vremenskoj domeni</i>	30
2.8. MJERNI INSTRUMENTI.....	31
2.8.1. <i>OTDR – Optical Time Domain Reflectometer</i>	31
2.8.2. <i>Uređaj za fuzijsko spajanje</i>	32
2.8.3. <i>Optički atenuator</i>	33
3. POF KABELI	34
3.1. STRUKTURA KABELA	35
3.2. VRSTE POF KABELA	36
3.2.1. <i>Jednomodni optički kabel</i>	37
3.2.2. <i>Višemodni optički kabel</i>	38
3.2.3. <i>Plastična optička vlakna</i>	39
4. PRIMJENA	40
4.1. POMORSTVO.....	40
4.2. AUTOMOBILSKA INDUSTRIJA	41

4.3. KUĆANSTVO.....	43
4.4. ZRAKOPLOVSTVO.....	45
4.5. MEDICINA	46
5. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA	48
KAZALO KRATICA.....	51
POPIS SLIKA.....	53
POPIS TABLICA	54
POPIS JEDNADŽBI.....	55

1. UVOD

Optički komunikacijski sustavi u širem smislu potječu iz antičkih vremena. Jedan od najranijih optičkih komunikacijskih sustava bio je vatra i dim. Iako atmosferski uvjeti, poput kiše, snijega, magle i prašine, snažno utječu na pouzdanost prijenosa, ova vrsta optičke komunikacije dugo se koristila diljem svijeta. Era električne komunikacije započela je 1837. godine izumom telegrafa Samuela F. B. Morsea. Telegrafski sustav koristio je Morsovu abecedu, koja predstavlja slova i brojeve šifriranom kombinacijom točaka i crtica. Kodirani simboli su prenošeni slanjem kratkih i dugih impulsa električne energije preko bakrene žice brzinom od nekoliko desetaka impulsa u sekundi. Još jedan golemi skok u povijesti komunikacijskih sustava donio je Alexander Graham Bell 1876. [7] Bell je razvio telefon koji je mogao prenositi cijeli glas kakav jest, u analognom signalu.

Plastično optičko vlakno (POF) oduvijek je "vrebalo u pozadini" u optičkim vlaknima; specijalno vlakno korisno za osvjetljenje i male podatkovne veze male brzine. Sada postoji znatno povećan interes za POF, budući da mu je istraživanje i razvoj omogućilo bolje performanse uz jednostavnost instalacije i nisku cijenu. POF je vlakno sa stepenastim indeksom velike jezgre i tipičnog promjera od 1 mm. Danas se mogu pronaći optička vlakna koja se koriste u raznim primjenama, poput medicinskog okruženja do industrije emitiranja. Koristi se za prijenos glasa, televizije, slika i podatkovnih signala kroz male fleksibilne niti od stakla ili plastike. Posljednjih godina postoji veliki istraživački interes za primjenu plastičnih optičkih vlakana s indeksom koraka (SI-POF) u jeftinim komunikacijskim vezama kratkog dosega, poput onih koje se koriste u kućnim i automobilskim mrežama. Jednostavnost ugradnje, visoka fleksibilnost, otpornost na savijanje, udarce i vibracije te ekonomičnost čini plastično optičko vlakno jako korisnim. [4] Pokazalo se da POF veze, osim većih brzina prijenosa podataka međupovezivanja, također mogu pružiti prednosti u pogledu troškova i snage u odnosu na uobičajene tehnologije temeljene na bakru.



Slika 1. Plastično optičko vlakno

Izvor: <https://www.lumitex.com/blog/optical-fiber-technology>

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Problem istraživanja je primjena POF vlakana u pomorstvu kao nove tehnologije. Predmet istraživanja je kako plastična optička vlakna mogu pridonjeti bržim i sigurnijim komunikacijama na brodu i jednostavniju uporabu. Objekt istraživanja je plastično optičko vlakno kao budućnost optike u industriji.

1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha ovog diplomskog rada je prikazati primjenu plastičnih optičkih vlakana i njegove karakteristike u pomorstvu. Cilj istraživanja je prikazati prednosti i nedostatke plastičnih optičkih vlakana.

1.3. STRUKTURA RADA

Diplomski rad se sastoji od 5 poglavlja. U prvom poglavlju je uvod u kojem je navedeno sve što će se istraživati, problematika rada, svrha i ciljevi istraživanja.

U drugom poglavlju navedeno je općenito o POF vlaknima, nakon toga gubici prijenosa, prijenosni kapacitet, materijali, vrste vlakana, tehnike izrade, mjerne metode i mjerni instrumenti.

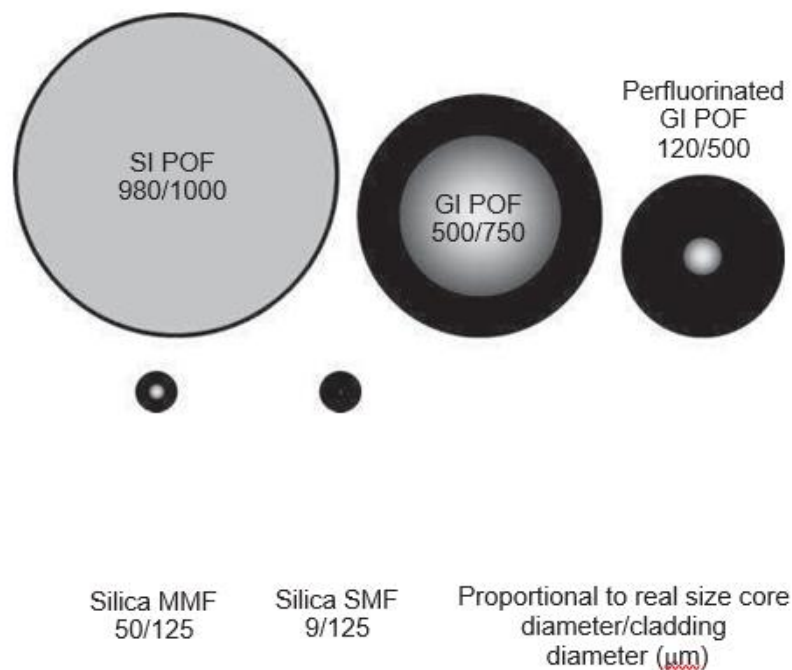
Treće poglavlje opisuje POF kabele, njihovu strukturu i tipove plastičnih optičkih kabela.

Četvrto poglavlje je primjena POF-a u pomorstvu, automobilske industriji, zrakoplovstvu, senzoricima i u kući.

Peto poglavlje donosi zaključak kojim je prikazano istraživanje i objašnjenja rezultata koji su bili u radnoj hipotezi postavljeni.

2. POF – PLASTIC OPTICAL FIBER

Plastična optička nit zbog svoje fleksibilnosti može imati veće promjere jezgre (do 1000 μm) od optičkih niti na bazi silicijevog dioksida, iako plastične optičke niti pokazuju relativno visoko prigušenje.[21] Ne mogu prodrijeti kroz ljudsku kožu niti se mogu slomiti savijanjem ili fizičkim udarom. Ove karakteristike omogućuju jednostavnu i jeftinu instalaciju i sigurno rukovanje. Potražnja za brзом komunikacijom putem interneta eksplozivno raste kako se povećava količina dostupnih podataka na osobnim uređajima. Sve su veće brzine prijenosa podataka potrebne za zaslone i kamere visoke razlučivosti. Plastične optičke niti privlače veliku pozornost jer električno ožičenje uzrokuje kritične probleme kao što je gore opisano. Uobičajene prednosti optičkih vlakana su njihova izuzetno velika širina pojasa, otpornost na elektromagnetske smetnje i otpornost na preslušavanje. Uz potražnju za sustavima za obradu podataka i komunikaciju velike brzine, GI POF-ovi postali su obećavajući za optička međusobna povezivanja, kao i optičko umrežavanje u LAN-ovima zbog svoje velike propusnosti, uz svoje prednosti za potrošačku upotrebu, kao što je visoka tolerancija na neusklađenost i savijanje, visoka mehanička čvrstoća i dugoročna pouzdanost.



Slika 2. Usporedba presjeka optičke niti s plastičnom optičkom niti

Izvor: Markus Beckers, and Tobias Schlüter, a Thomas Vad, a Thomas Griesa and Christian-Alexander Bunge „An overview on fabrication methods for polymer optical fibers“, Wiley Online Library, 2014.

Princip širenja svjetlosti kroz optička vlakna jednostavno se prikazuje. Optičko vlakno sastoji se od dva sloja u cilindričnom obliku: jezgre u središnjem dijelu vlakna i omotača u vanjskom dijelu koji u potpunosti okružuje jezgru. Iako omotač nije potreban za širenje svjetlosti, bitan je u praktičnoj upotrebi za zaštitu jezgre. Jezgra se zaštićuje od fizičkog kontakta zbog kojeg dolazi do nesavršenosti i promjena indeksa loma. Cilj je poboljšanje mehaničke čvrstoće kabela. Jezgra ima nešto veći indeks loma od omotača. Kada je upadni kut ulazne svjetlosti u jezgru veći od kritičnog kuta, ulazna svjetlost ograničena je na područje jezgre i širi se na velikoj udaljenosti kroz vlakno jer se svjetlost stalno ponavlja. Tablica 1. prikazuje usporedbu između plastične niti i silicijeve niti. Plastična nit je cijenom jeftinija od silicijeve niti. Kod plastične niti gubici su veliki-srednji dok su gubici kod silicijeve niti srednji-niski. Kod spajanja plastika je puno jednostavnija i zahtjeva vrlo malo obuke, dok kod stakla je duži postupak koji zahtjeva dobru obuku. Rukovanje je jednostavnije kod plastike. Plastična nit je fleksibilnija, dok je staklo gledano na savitljivost lomljivo. Valna duljina kod plastike je vidljiva dok kod stakla je infracrveno. Numerička apertura ili raspon kutova je kod plastike veliki (0,5), dok je kod stakla maleno (0,1-0,2). Pojasna širina kod plastike i kod stakla je velika (40 gb/s na 100m). Oprema za ispitivanje je niske cijene kod plastike, a kod stakla je skuplja. Plastične niti zahtjevaju manje troškove sustava, a silicijeve niti zahtjevaju visoke troškove sustava. [7]

	PLASTIKA	STAKLO
Cijena	Jeftinije	Skuplje
Gubici	Veliki - srednji (kratka rastojanja)	Srednji - niski (duga rastojanja)
Spajanje	Jednostavno , zahtjeva vrlo malo obuke	Duži postupak, zahtjeva dobru obuku
Rukovanje	Jednostavno	Zahtjeva obuku i zaštitu
Savitljivost	Fleksibilno	Lomljivo
Valna duljina	Vidljivo	Infracrveno
Numerička apertura	Velika (0.5)	Mala (0.1-0.2)
Pojasna širina	Velika (40 Gb/s na 100 m)	Znatna (40 Gb/s)
Oprema za ispitivanje	Niske cijene	Skupa
Troškovi sustava	Sveukupno – niska	Visoka

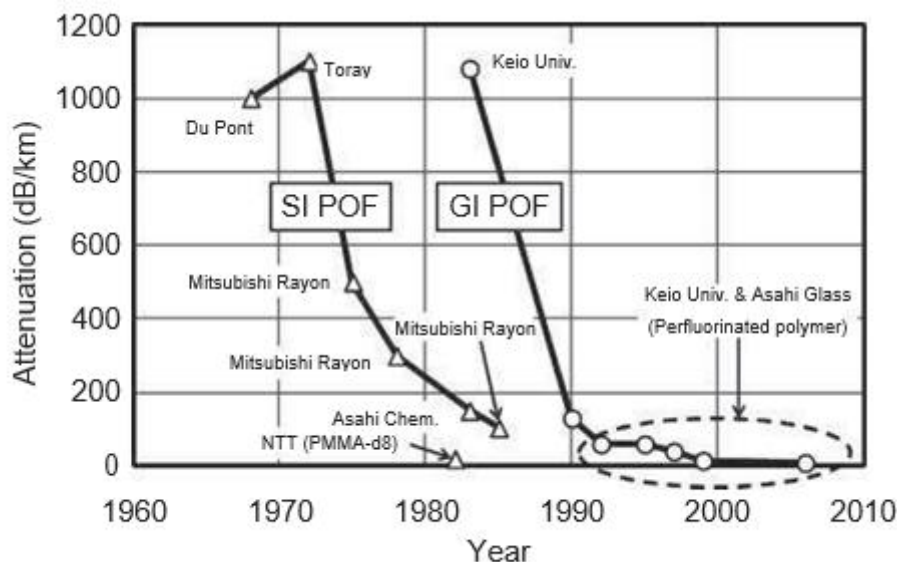
Tablica 1. Usporedba plastične i silicijeve niti

Izvor: pripremio student

2.1. POVIJEST

U optičkoj komunikaciji nije bilo prevelikog napretka sve do izuma lasera početkom 1960-ih jer nije postojao praktičan odašiljač, a svi komunikacijski sustavi moraju uključivati temeljne elemente odašiljača, prijenosnog medija i prijemnika. Izum lasera izazvao je znatiželju oko mogućnosti korištenja područja optičke valne duljine elektromagnetskog spektra za prijenosne sustave.

Plastične optičke niti prvi put je prikazao Mitsubishi Rayon 1975 godine.[5] Problem ranih plastičnih optičkih niti bilo je veliko prigušenje (1000 dB/km), a duljina prijenosa bila je kritično ograničena na samo nekoliko metara. Zbog toga su bile korištene za ograničene primjene: za vođenje svjetla, osvjetljenja i senzore. Analize prigušenja u plastičnim optičkim nitima pokazale su da je visoko prigušenje uzrokovano vanjskim čimbenicima. Postignuća plastične optičke niti s malim gubicima prikazana su na slici 3.



Slika 3. Prikaz smanjenja atenuacije kod plastičnih optičkih niti

Izvor: Casimer DeCusatis, „Handbook of Fiber Optic Data Communication – Fourth Edition“, Elsevier, 2014

Iako je prigušenje u plastičnim optičkim nitima smanjeno širina pojasa je ozbiljno ograničena modalnom disperzijom i daleko je od zahtjeva za prijenos podataka velikom brzinom. Prvi GI POF prijavljen je 1982. GI POF teoretski ima veliku širinu pojasa, ali prigušenje je bilo veće od 1000 dB/km. Stoga je razvoj plastičnih optičkih niti ponovno naišao na probleme prigušenja. Sumnjalo se da su nečistoće i onečišćenja dominantni čimbenik u

visokom prigušenju. Dodavanje dopanta suprotstavilo se trendu pročišćavanja kako bi se smanjilo slabljenje jer se dopant smatrao vrstom nečistoće. Međutim, razvijen je GI POF s malim gubicima i velikom propusnošću s dopantom. Ovo je bio proboj za brze POF mreže. Prigušenje je dodatno smanjeno, a širina pojasa je dodatno povećana. Metoda proizvodnje do 2005. bila je metoda preforme s naglaskom na metodu polimerizacije međufaznog gela. 2008. uspjelo se u prijenosu od 40 Gb/ 100m. [9] To je bila najveća brzina prijenosa na svijetu, nadmašujući silikatno optičko vlakno tipa GI. Charles K. C. dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 2009. za razvoj optičkih vlakana s malim gubicima. Sustavi optičkih vlakana obično pružaju velike prednosti kao što su veća udaljenost, veći informacijski kapacitet, otpornost na elektromagnetske smetnje, sigurnost informacija, manja veličina i manja težina. Aplikacije za ove sofisticirane mreže uključuju pregledavanje weba, razmjenu e-pošte, obrazovanje na daljinu te grid i računalstvo u oblaku. Budući da velika mehanička tolerancija omogućuje jednostavnu i isplativu instalaciju, ponovno su postali privlačni i postupno su se instalirali u mreže kratkog dosega kao što su lokalne mreže (LAN) u domovima, uredima, bolnicama i vozila, pa čak i mreže vrlo kratkog dometa unutar računala koje sadrže mnogo veza.

2.2. GUBICI PRIJENOSA

Povijest plastičnih optičkih vlakana (POF) je bila povijest pokušaja da se smanji njihov gubitak prijenosa. Gubitak prijenosa ograničava koliko se signal može širiti u vlaknu prije nego što optička snaga postane preslaba da bi se mogla detektirati. Mjeri količinu svjetlosti izgubljenu između ulaza i izlaza; obično se izražava u decibelima i definiše. To je zbroj svih gubitaka. Različiti mehanizmi koji doprinose gubicima u POF-ima u osnovi su slični onima za staklena optička vlakna (GOF), ali su relativne veličine različite. Jednadžba 1. prikazuje formulu za gubitak prijenosa, koji se dijele na unutarnje i vanjske čimbenike. Iako vanjski čimbenici kao što su onečišćenja ili nesavršenosti valovoda ponekad mogu uzrokovati značajne gubitke, nakon što se postigne optimalni proces proizvodnje, mogu se zanemariti. Unutarnji čimbenici se dalje klasificiraju na gubitke na apsorpciju i raspršivanje. [27] Ovo poglavlje posvećeno je raspravi o tim utjecajima na POF-ove i kako je smanjen gubitak prijenosa.

$$\text{dB} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

Jednadžba 1. Prikaz formule za gubitak prijenosa

Izvor: Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018.

2.2.1. Gubitak apsorpcije

Elektronična prijelazna apsorpcija svjetlosti u POF materijalima ovisi o njezinoj frekvenciji ili valnoj duljini jer materijali imaju različite razine energije koje su uključene u apsorpcijske prijelaze. U valnim duljinama svjetlosti koje se koriste za prijenos podataka s POF-ovima, intrinzični gubici apsorpcije uzrokovani su apsorpcijama elektroničkog prijelaza ili apsorpcijama molekularnih vibracija. [28] Vrhovi apsorpcije elektroničkog prijelaza tipično se pojavljuju na ultraljubičastim valnim duljinama, a njihovi apsorpcijski repovi utječu na gubitke u prijenosu POF-ova. Apsorpcije molekularnih vibracija obično se opažaju na infracrvenim valnim duljinama, koje odgovaraju rezonantnim frekvencijama za molekularne vibracije.

2.2.2. Rayleighovo raspršenje

Rayleighovo raspršenje odnosi se na raspršivanje svjetlosti od molekula zraka, a može se proširiti na raspršenje od čestica do otprilike desetine valne duljine svjetlosti. To je Rayleigh raspršivanje molekula zraka što daje plavo nebo. [29] Lord Rayleigh je izračunao raspršeni intenzitet od dipolnih raspršivača mnogo manji od valne duljine. Rayleighovo raspršenje se može smatrati elastičnim raspršenjem budući da se energije fotona raspršenih fotona ne mijenjaju. Raspršenje u kojem raspršeni fotoni imaju višu ili nižu energiju fotona naziva se Ramanovo raspršenje. Obično ova vrsta raspršenja uključuje pobuđivanje nekog vibracijskog načina molekula, davanje niže raspršene energije fotona, ili raspršivanje pobuđenog vibracijskog stanja molekule koje dodaje svoju vibracijsku energiju upadnom fotonu. Gubici raspršivanja u polimerima proizlaze iz mikroskopskih varijacija u gustoći materijala. [10] Jednadžba 2. prikazuje kada prirodna svjetlost intenziteta I_0 prođe kroz udaljenost y , a njezin se intenzitet smanji na I gubitkom raspršenja, raspršenje se definira kao

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\gamma y)$$

Jednadžba 2. Formula Rayleighovog raspršenja

Izvor: Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018.

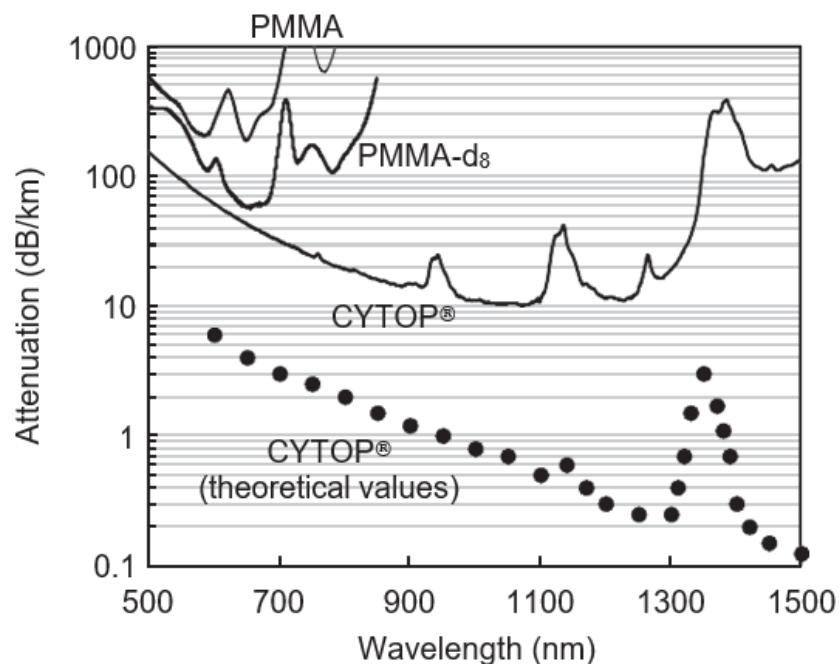
2.2.3. Plastične optičke niti s malim gubicima

2.2.3.1. Plastične optičke niti na bazi PMMA

SI POF je također bio povoljan u smislu masovne proizvodnje; nije bio samo jeftin za izradu, već i jednostavan za kalupljenje i proizvodnju. Prvi komercijalni POF bio je Eska, SI POF baziran na PMMA koji je predstavio Mitsubishi Rayon 1975. [22] Kasnije su Asahi Chemical i Toray također ušli na tržište. Prva vlakna su bila nedovoljno prozirna za korištenje kao komunikacijski medij unutar zgrade, a njihova primjena bila je strogo ograničena na područja iznimno kratkog dometa kao što su svjetlosni vodiči, osvjetljenje, audio podatkovne veze i senzori. Analizom svakog čimbenika prigušenja vlakana kako je gore opisano, ograničenja POF-a temeljenih na nekoliko materijala i njihova teorijska utemeljenost kontinuirano su se pojašnjavala. Nadalje, pokazalo se da glavni čimbenici koji uzrokuju visoko prigušenje nisu intrinzični, već ekstrinzični, kao što su onečišćenja koja se miješaju u polimer tijekom proizvodnje vlakana. Pripremom vlakana u potpuno zatvorenom sustavu od destilacije monomera do izvlačenja vlakana, proizvedeni su POF s malim gubicima s gubicima blizu teoretskih granica. Otkako je prvi SI POF komercijaliziran, većina POF-ova proizvedena je korištenjem PMMA, masovno proizvedenog, komercijalno dostupnog polimera koji pokazuje visoku propusnost svjetlosti i pruža izvrsnu otpornost na koroziju na kemikalije i vremenske uvjete. [26] Ova svojstva, zajedno s niskim troškovima proizvodnje i jednostavnom obradom, učinila su PMMA vrijednom zamjenom za staklo u optičkim vlaknima.

2.2.3.2. Plastične optičke niti na bazi CYTOP

CYTOP je amorfni perfluorirani polimer. Prvi GI POF na bazi CYTOP-a komercijaliziran je 2001. Slika 6. uspoređuje spektre prigušenja PMMA-, PMMA-d₈- i GI POF-ova na bazi CYTOP-a. CYTOP molekule sastoje se samo od C–C, C–F i C–O veza. [35] Valne duljine osnovnih vibracija istezanja ovih atomskih veza relativno su duge; stoga je gubitak apsorpcije vibracija u CYTOP-u na valnim duljinama izvora svjetlosti zanemarivo mali. Osim toga, pokazuje prilično slabo raspršenje svjetlosti zbog niskog indeksa loma. Prigušenje u GI POF baziranom na CYTOP-u je približno 10 dB/km na 1,0 μm. [4] Teoretski spektar prigušenja GI POF-a na temelju CYTOP-a izračunat je korištenjem Morseove teorije potencijalne energije i termički inducirane teorije fluktuacije kako bi se uzeli u obzir inherentni gubici apsorpcije i raspršenja. S obzirom da je teorijska granica prigušenja 0,7 dB/km na ovoj valnoj duljini, očekuje se da se prigušenje može dodatno smanjiti sprječavanjem kontaminacije tijekom izrade. Na slici 4. prikazani su spektri prigušenja PMMA i GI POF-ova na bazi CYTOP-a.



Slika 4. Spektri prigušenja PMMA i GI POF-ova na bazi CYTOP-a

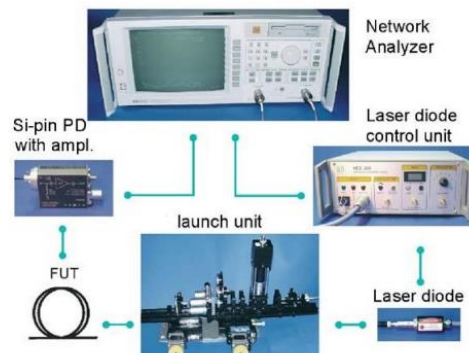
Izvor: IEE 802.3 Ethernet Working Group, „Gigabit over Plastic Optical Fibre“, 2016

2.3. PRIJENOSNI KAPACITET

Širina pojasa vlakna određuje maksimalnu brzinu prijenosa podataka ili maksimalnu udaljenost prijenosa. Najčešći POF (plastično optičko vlakno) prijenosni sustavi prihvaćaju on-off keying izravnom modulacijom optičkog izvora (laser ili dioda koja emitira svjetlo). Ako se valni oblik ulaznog impulsa može detektirati bez izobličenja na drugom kraju vlakna, maksimalna duljina veze ograničena je slabljenjem vlakna. Međutim, osim prigušenja optičke snage, izlazni impuls je općenito vremenski širi od ulaznog impulsa. Ovo širenje impulsa ograničava kapacitet prijenosa, odnosno širinu pojasa vlakna.

2.3.1. Širina pojasa (Bandwith)

Širina pojasa opisuje raspon frekvencija koje se mogu prenijeti kroz kanal i brzinu kojom se podaci mogu prenositi kroz njega. Širina pojasa optičke niti važan je čimbenik pri projektiranju prijenosnog sustava s optičkim vlaknima. Za plastično optičko vlakno, širina pojasa ovisi o modalnoj disperziji svjetlosnog signala u vlaknu. Na to utječe valna duljina korištene svjetlosti, uvjeti pokretanja svjetlosti, indeks loma vlakna i duljina vlakna. Kontroliranjem ovih parametara može se smanjiti kako bi se postigla određena propusnost ili brzina prijenosa podataka. Na širinu pojasa također utječe indeksni profil vlakna. POF s stupnjevanim indeksom (GI-POF) ograničava broj načina prijenosa bolje nego konvencionalni POF s stepenastim indeksom (SI-POF), što ima učinak kontinuiranog usmjeravanja svjetlosti prema središtu jezgre vlakna. To smanjuje modalnu disperziju i posljedično povećava propusnost, koja je gotovo dvostruko veća od SI-POF. Mjerenje propusnosti velikih vlakana jezgre je teško, a kao rezultat toga, ne postoji standardizirana definicija za to ili proces. Eksperimentalna mjerenja provode se pomoću vrlo kontroliranih parametara, kao što su kut lansiranja svjetlosti i svojstva odašiljača i prijarnika. [2] Na slici 5. je mjerenje bandwith-a.



Slika 5. Eksperimentalno mjerenje bandwith-a

Izvor: Casimer DeCusatis, „Handbook of Fiber Optic Data Communication – Fourth Edition“, Elsevier, 2014

2.3.1.1. Intermodalna disperzija

Kada se optički impuls unese u MMF (višemodnu nit), optička snaga impulsa se općenito raspoređuje na ogroman broj modova vlakna. Različiti modovi putuju različitim brzinama širenja duž vlakna, različiti načini pokretanja u isto vrijeme dolaze do izlaznog kraja vlakna u različito vrijeme. Stoga se ulazni impuls širi u vremenu dok putuje duž MMF-a. Ovaj učinak širenja pulsa, dobro poznat kao modalna disperzija, značajno je uočen u MMF-ovima s indeksom koraka (SI). Različite zrake putuju duž staza s različitim duljinama, pri čemu se svaka posebna zraka može smatrati modom u jednostavnoj interpretaciji. [19] Svjetlost putuje istom brzinom duž svoje optičke putanje zbog konstantnog indeksa loma kroz područje jezgre u SI MMF-ovima. Posljedično, ista brzina, ali različite duljine puta rezultiraju različitim brzinama širenja duž vlakna, što uzrokuje širenje impulsa u vremenu. Širenje impulsa uzrokovano modalnom disperzijom ozbiljno ograničava brzinu prijenosa u MMF-ovima jer preklapanje proširenih impulsa inducira smetnje i ometa ispravnu detekciju signala, čime se povećava stopa pogreške u bitu. Modalna disperzija općenito je dominantan čimbenik u širenju impulsa u MMF-ovima, a posebno u SI MMF-ovima. [41]

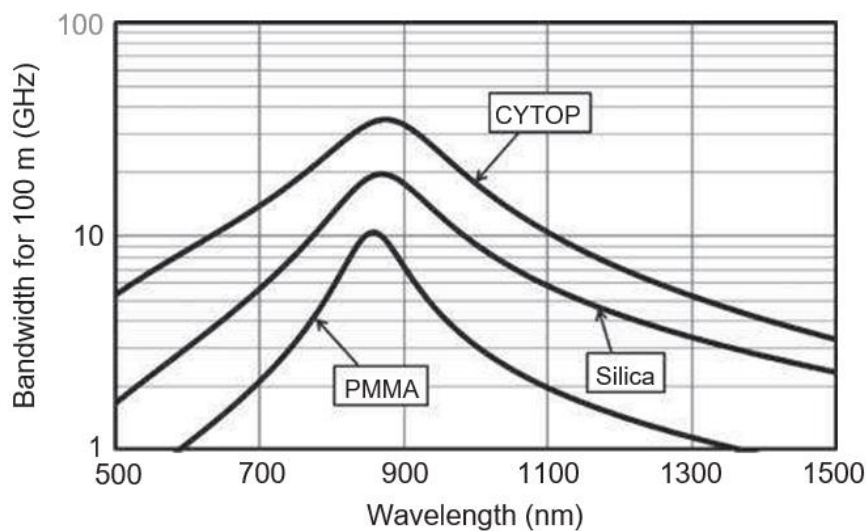
2.3.1.2. Intramodalna disperzija

Intramodalna disperzija ili kromatska disperzija je širenje impulsa uzrokovano konačnom spektralnom širinom izvora svjetlosti. [23] Intramodalna disperzija se sastoji od materijalne i valovodne disperzije. Disperzija materijala inducirana je ovisnošću indeksa loma materijala jezgre o valnoj duljini. Grupna brzina danog moda ovisi o valnoj duljini zbog toga se izlazni impuls širi u vremenu čak i kada optički signali s različitim valnim duljinama slijede isti put. Ovaj učinak je općenito mnogo manji od modalne disperzije u MMF-ovima, ali više nije zanemariv kada je modalna disperzija dovoljno potisnuta.

Disperzija valovoda proizlazi iz ovisnosti o valnoj duljini distribucije optičke snage moda između jezgre i omotača. Svjetlost na kraćim valnim duljinama potpunije je ograničena na područje jezgre, a svjetlost na dužim valnim duljinama više se distribuira u omotaču. Budući da je više svjetlosti duže valne duljine u ovojnici, ona putuje većom brzinom širenja, jer je indeks loma omotača niži od indeksa jezgre.

2.3.1.3. Plastične optičke niti velike propusnosti

Veliki broj modova, obično više od desetaka tisuća, može se širiti u POF-ovima zbog velikih jezgri. Stoga je smanjenje modalne disperzije ključno pitanje u takvim multimodnim POF-ovima. GI POF je predložen za smanjenje ograničenja propusnosti uzrokovano velikom modalnom disperzijom SI POF, a profil indeksa loma može se precizno kontrolirati i optimizirati. Propusnost GI POF-a dramatično je povećana na nekoliko gigaherca preko 100 m takvom kontrolom indeksnog profila. To je zbog smanjenja modalne disperzije uzrokovane uglavnom profilom stupnjevanog indeksa loma. Stoga je GI POF obećavajući kandidat za prijenosni medij za mreže velike brzine i kratkog doseg. [25] Slika 6. opisuje profile indeksa loma koji su optimizirani na valnoj duljini od 850 nm, a efektivna spektralna širina izvora svjetlosti im je pretpostavljena 1 nm. [32]



Slika 6. Prikaz profila indeksa loma

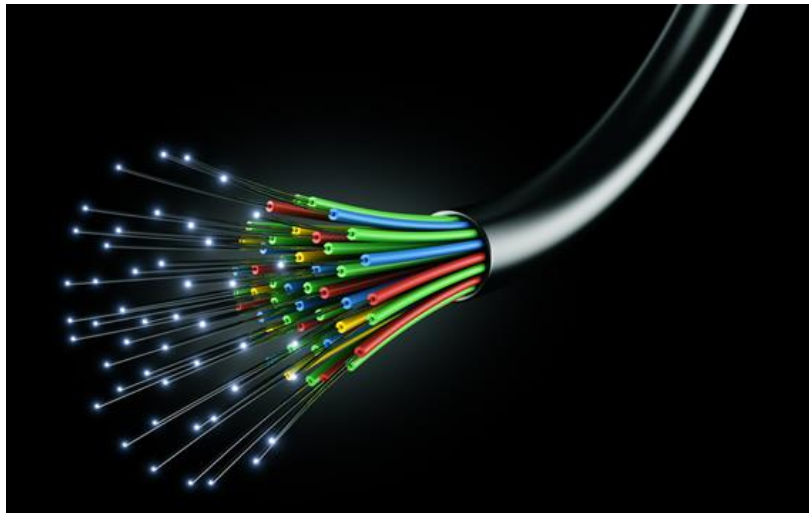
Izvor: IEE 802.3 Ethernet Working Group, „Gigabit over Plastic Optical Fibre“, 2016

2.3.2. Širenje valova kod plastičnih optičkih niti

Širina pojasa prijenosa GI POF-ova proširena je razvojem nisko-disperzijskih materijala i tehnika kontrole GI profila. Spajanje modova u GI POF-ovima može proizaći iz nekog drugog fenomena osim mikrosavijanja, dominantnog porijekla u staklenim MMF-ovima, čiji se učinci spajanja modova obično mogu promatrati za prijenos tijekom nekoliko kilometara. [36] Materijali optičkih vlakana pokazuju fluktuacije gustoće zbog svoje amorfne prirode. Ove fluktuacije u staklima rezultiraju Rayleighovim raspršenjem jer su njihove karakteristične skale mnogo manje od valnih duljina vođene svjetlosti koja se koristi u staklenim MMF-ovima. Rayleighovo raspršenje inducira slučajni način spajanja, ali je učinak preslab da bi utjecao na propusnost prijenosa staklenih MMF-ova duljine manje od nekoliko stotina metara. Međutim, polimeri kao što je PMMA imaju duže fluktuacije mikroskopskih heterogenih struktura. Stoga mikroskopske heterogenosti u POF jezgrama mogu rezultirati spregom modova jer POF jezgre pokazuju veće raspršenje naprijed nego stakla. Intrinzična svojstva materijala zanemarena su u analizama prijenosa GI POF. Spajanje intrinzičnog načina rada rezultira značajnim smanjenjem šuma u MMF optičkim vezama, što omogućuje jeftine radio-over-fiber (RoF) sustave u kućnim mrežama i mrežama zgrada.

2.4. MATERIJALI

Otkako je prvi POF (plastično optičko vlakno) izumljen sredinom 1960-ih, uloženi su značajni naponi da se razviju materijali kako bi se poboljšale performanse POF-a. Temeljni zahtjevi za odabir ili dizajn materijala za izradu POF-a su da polimer mora biti potpuno proziran, otporan na visoke temperature, da se može uvući u vlakno i da je mehanički fleksibilan. Iako zahtjevi za temperaturom ovise o tome gdje i kako se koriste POF, u većini slučajeva poželjno je da njihov T_g bude iznad $80\text{ }^\circ\text{C}$. [28] Gore spomenuta četiri zahtjeva primjenjiva su neovisno o tome koriste li se polimeri kao jezgra ili za oblaganje. Međutim, polimer jezgre POF-a s stupnjevanim indeksom (GI) također bi trebao imati sljedeće zahtjeve: nizak indeks loma i nisku disperziju materijala. Poželjno je da indeks loma polimera bude što je moguće niži, tako da se niža koncentracija dopanta može koristiti za formiranje GI profila. Disperzija materijala nije važna za POF-ove s indeksom koraka (SI) jer njihovom propusnošću gotovo dominira modalna disperzija. Međutim, za GI POF, to može biti ključno u određivanju prijenosnog kapaciteta vlakana. Na slici 7. prikazana je plastična optička nit.



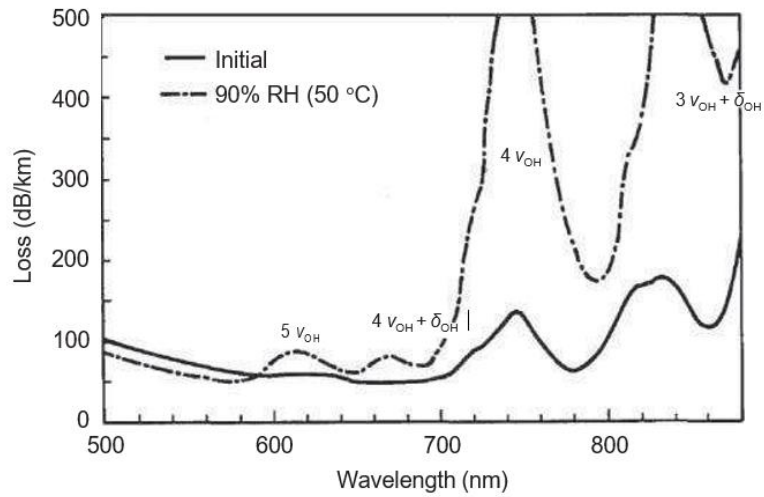
Slika 7. Prikaz plastične optičke niti

Izvor: https://www.agc-chemicals.com/sg/en/fluorine/products/detail/use/detail.html?uCode=SG-EN-F019_5

2.4.1. PMMA (polymethylmethacrylate)

PMMA je masovno proizveden, komercijalno dostupan polimer koji pruža izvrsnu otpornost na kemijsku i vremensku koroziju. Transmitantnost PMMA je najveća među općim optičkim polimerima. Poznato je da PMMA prenosi 93-94% vidljive svjetlosti i reflektira ostatak. [11] Od prvog POF-a koji je komercijalizirao Mitsubishi Rayon 1975. godine, većina SI POF-ova proizvedena je korištenjem PMMA. Opsežno su korišteni u industrijskim terenskim autobusima za upravljanje procesnom opremom u teškim proizvodnim okruženjima, te u automobilima za povezivanje sve većeg niza multimedijske opreme. Sve veća složenost elektroničkih sustava u vozilu posebno je dovela do toga da SI POF-ovi na bazi PMMA postaju nezamjenjivi u automobilskoj industriji. Normalno je pronaći 10 ili 20 potrošačkih elektroničkih uređaja ugrađenih u automobile, na primjer, navigacijske sustave, telefone, bluetooth sučelja, sustave za prepoznavanje glasa, vrhunska pojačala i TV prijemnike. Za ispunjavanje svih potrebnih zahtjeva za prijenos podataka među takvim uređajima, SI POF-ovi na bazi PMMA, koji nude do nekoliko stotina megabita u sekundi, pokazali su se kao idealno rješenje.

Međutim, ako su potrebne brzine prijenosa podataka brže od 1 Gbps, slabljenje postaje problem u PMMA vlaknima. Sustavi za primjenu na kratkim udaljenostima koristili su SI POF bazirane na PMMA kao prijenosni medij i crvene diode koje emitiraju svjetlost (LED) s valnom duljinom od 650 nm kao izvor svjetlosti. Da bi se ostvarila gigabitna komunikacija, ne samo da se vlakno mora zamijeniti GI POF-om, već je neophodan i odgovarajući izvor svjetlosti s većom propusnošću modulacije. Po trenutnim istraživanjima laseri s površinskim emitiranjem vertikalne šupljine (VCSEL) nude najveće brzine prijenosa do 10 Gbps. [15] VCSEL su relativno nova klasa poluvodičkih lasera za koje se očekuje da će postati ključni uređaji u gigabitnom Ethernetu, brzim lokalnim mrežama, računalnim vezama i optičkim interkonekcijama. I kod VCSEL-a je udaljenost prijenosa ozbiljno ograničena. Slika 8. prikazuje promjenu spektra prigušenja SI POF-a na bazi PMMA-d8 prije i nakon ubrzanog ispitivanja vlage pri 90% RH i 50 °C.



Slika 8. Spektri slabljenja SI POF-a na bazi PMMA prije i nakon ispitivanja visoke vlažnosti pri 90% i 50°C

Izvor: Christian – Alexander Bunge, Thomas Gries and Markus Beckers, „Polymer Optical Fibres“, Elsevier, 2016.

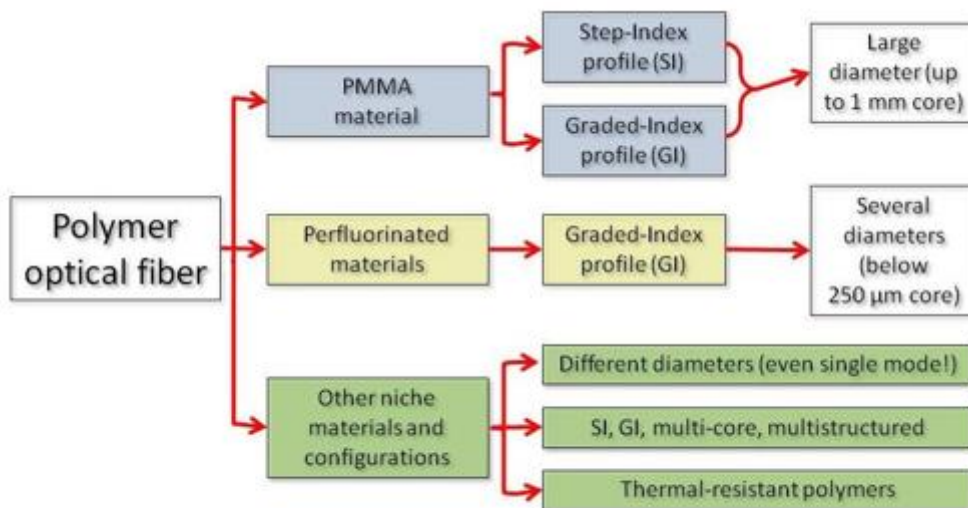
2.4.2. CYTOP

Budući da je visoko prigušenje PMMA uzrokovano tonovima apsorpcije vibracija C–H, najučinkovitija metoda za dobivanje POF s malim gubicima je zamjena svih atoma vodika težim atomima kao što je fluor, što pomaže u izbjegavanju apsorpcije vode. Zamjena vodika fluorom također poboljšava toplinsku stabilnost, kemijsku otpornost i električna svojstva POF-a. Veličina atoma fluora omogućuje stvaranje jednolikog i kontinuiranog omotača oko veza ugljik-ugljik i štiti ih od napada, čime se molekuli daje povećana kemijska otpornost i stabilnost. Najtipičniji primjer je tetrafluoroetilen (TFE), koji je razvio DuPont 1938. [27] Kao što je poznato, poli(tetrafluoroetilen) je neprozirno bijele boje. TFE polimerizira linearno bez grananja, što dovodi do praktički savršene strukture lanca i prilično velike molekularne težine. Lanci imaju minimalne interakcije i kristaliziraju se u gotovo 100% kristalnu strukturu. Druge perfluorirane smole također imaju više ili manje slična svojstva i lako tvore barem djelomično kristalne strukture. Svjetlost se raspršuje na granicama između amorfne i kristalne faze, uzrokujući zamućenost. [1]

Izvršne karakteristike niskih gubitaka GI POF-ova baziranih na CYTOP-u ponekad su daleko iznad zahtjeva za mreže kratkog dometa. Jedinствена značajka ovih vlakana je niska disperzija materijala koja proizlazi iz niske dielektrične konstante. GI POF-ovi bazirani na CYTOP-u mogu imati veću propusnost od multimodnih GOF-ova- staklena optička vlakna. 2010. godine AGC je izdao još jedan GI POF baziran na CYTOP-u pod nazivom Fontex™. Korištenjem strukture dvostruke obloge (tanki sloj sa znatno nižim indeksom loma postavljen oko prve obloge), gubitak savijanja je dodatno smanjen dok je kapacitet velike brzine održan, čime su omogućeni različiti dizajni ožičenja. Osim toga, uvođenjem procesa koekstruzije uspostavljena je kontinuirana proizvodnja GI POF-a.

2.5. VRSTE POF VLAKANA

Mogu se identificirati dvije glavne vrste POF vlakana, a to su Step-Index POF s velikom jezgrom i Graded-Index POF. Prilično je uobičajeno identificirati prvu vrstu vlakana kao POF, a drugu kao PF-POF (napravljeno od perfluoriranog materijala) ili GI-POF. [3] Uobičajeno se koriste PMMA-SI-POF velikih vlakana indeksa koraka jezgre izrađenih od PMMA materijala. Korištenje polimera umjesto stakla daje određene prednosti u smislu mehaničke otpornosti i ugradnje u neprijateljskim okruženjima kao što je prisutnost vode ili visoke vlažnosti. Tako da je mnogo istraživanja provedeno kako bi se smanjio gubitak performansi prijenosa. Slika 9. prikazuje podjelu vrsta POF-a. PMMA se dijeli na SI – Step Index i na GI – Graded index gdje je promjer do 1mm jezgre. Perfluorinirani materijali se dijele na GI – Graded index koji ima promjer ispod 250 μm jezgre.

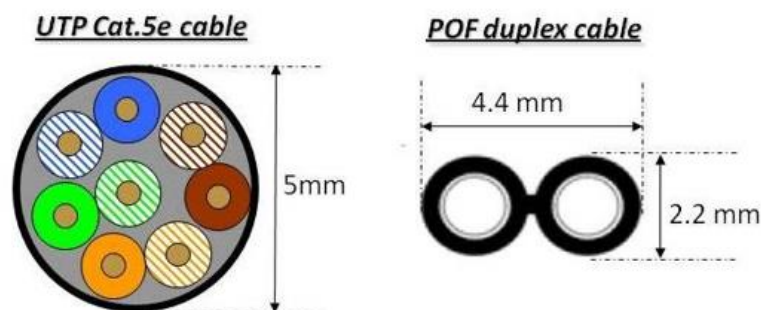


Slika 9. Prikaz vrsta POF-a

Izvor: Yoshirio Tsukamoto, „Plastic optical fiber standard“, Mitsubishi Rayon CO.,2014

2.5.1. Step Index POF

Najrasprostranjeniji PMMA-SI-POF ima promjer jezgre od 980 μm i promjer od 1 mm, dok varijanta s promjerom od 500 μm postaje sve zanimljivija; međutim standardizirana je samo prva vrsta vlakana. Uspjeh vlakana od 1 mm duguje se širokom rasponu primjena (Hi-Fi, infotainment sustavi u automobilima, video nadzor, kućno umrežavanje) i zanimljivim mehaničkim karakteristikama s obzirom na GOF. Glavne prednosti koje ova vrsta POF ima u odnosu na druga vlakna su visoka mehanička otpornost. Fleksibilnost plastičnog materijala omogućuje grubo rukovanje vlaknom, kao što je jako savijanje i naprezanje, bez nanošenja trajnih oštećenja. Jezgra od 980 μm i numerička apertura od 0,5 dopuštaju određenu neusklađenost usklađivanja u procesima povezivanja s odašiljačem i prijammnikom između vlakana. [8] Visokom mehaničkom tolerancijom izbjegava se korištenje skupih preciznih alata za povezivanje. Promjer jezgre također dopušta određenu toleranciju na savijanje. Rezanje vlakana može se napraviti uobičajenim škarama, a poliranje brusnim papirom. Povezivanje je brzo i jednostavno putem stezanja ili spin konektora, dok je u novijim primopredajnicima također predviđeno spajanje bez konektora. PMMA materijal učinkovito radi u vidljivoj valnoj duljini, odnosno crvenoj, zelenoj i plavoj (650 nm, 520 nm i 480 nm). [22] PMMA je također vrlo otporan na vodu i more. To čini POF prikladnim za pomorske primjene. Ove prednosti ogledaju se u 500 μm PMMA-SI-POF, s očitom napomenom da su tolerancije poravnanja niže. S druge strane, PMMA-SI-POF pati od velikog prigušenja i niske propusnosti. Kako je prigušenje uzrokovano materijalom, ograničenja propusnosti uzrokovana su veličinom jezgre i profilom indeksa. Na slici 10. moguće je vidjeti usporedbu između standardnih UTP Cat. 5e kabel i PMMA-SI-POF duplex kabel. Iz slike je vidljivo da je POF kabel manjih dimenzija i da lako može zamijeniti bakreni kabel.

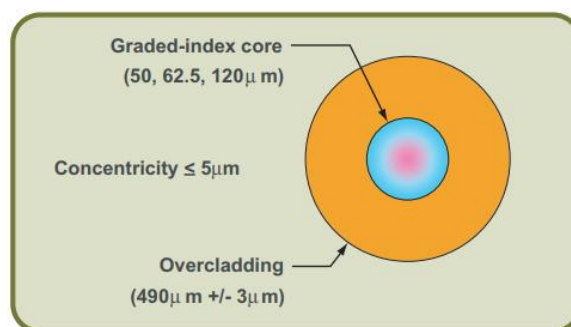


Slika 10. Usporedba između standardnog UTP Cat.5e bakrenog kabela i PMMA-SI-POF duplex kabela

Izvor: Izvor: Yoshirio Tsukamoto, „Plastic optical fiber standard“, Mitsubishi Rayon CO.,2014

2.5.2. Graded index POF

Perfluorirana polimerna optička vlakna s stupnjevanim indeksom (GI-POF) kombiniraju visoke brzine prijenosa podataka i nisko prigušenje u komercijalno poželjnom rasponu od 850–1300 nm. [38] GI-POF-ovi nude izravnu zamjenu i jeftinu alternativu tradicionalnom staklu. Uz jednostavnu upotrebu i pristupačnost, GI-POF-ovi su izvrstan izbor za instalaciju optičkih mreža visokih performansi. GI-POF-ovi pružaju veću propusnost prijenosa od bilo koje druge vrste plastičnih optičkih vlakana. Svi komercijalno dostupni POF-ovi bili su proizvedeni od nefluoriranih polimera kao što je polimetilmetakrilat (PMMA) i, kao rezultat toga, imali su indeks loma koji se mijenja u koracima. Iako su jeftinija ova vlakna karakterizira velika modalna disperzija i obično rade na 530 nm ili 650 nm, što je znatno izvan standardnih komunikacijskih valnih duljina (850 nm ili 1300 nm), gdje su primopredajnici velike brzine dostupni. Zbog velikog prigušenja u bliskom infracrvenom području, ova su vlakna ograničena na primjene niske izvedbe (<100 Mb/s), kratkog dometa (<50 m) u vidljivom području. Pojavom CYTOP-a ograničenja koja predstavljaju POF-ovi sa stupnjevitim indeksom su prevladana. Perfluorirano vlakno pokazuje vrlo nisko prigušenje u bliskom infracrvenom području ~10dB/km. [7] Brzine prijenosa do 10Gb/s za udaljenosti do 100m. Za razliku od konvencionalnih staklenih vlakana, koja pate od visokih troškova međusobnog povezivanja i prijamnika, perfluorirani GI-POF-ovi se lako postavljaju. Za dodavanje konektora na stakleno vlakno, vlakno se mora rascijepiti skupim, specijaliziranim alatom. Zatim se epoksid koristi za pričvršćivanje vlakana na hardver konektora. Na kraju, sastavljeni konektor mora biti ispoliran. Nasuprot tome, GI-POF se može prekinuti korištenjem jednostavnih i jeftinih alata, konektori se uvijaju, a poliranje se odvija u samo nekoliko sekundi, što dovodi do visokokvalitetne optičke veze. GI-POF-ovi su kompatibilni sa standardnim višemodnim primopredajnicima od staklenih vlakana.



Slika 11. Prikaz presjeka GI-POF

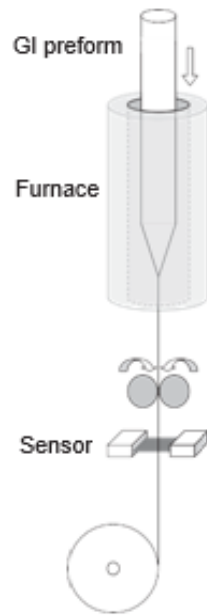
Izvor: <https://i-fiberoptics.com/basics.php>

2.6. TEHNIKE IZRADE POF-A

Postupci proizvodnje POF-ova (plastičnih optičkih vlakana), bez obzira na njihov profil s indeksom koraka (SI) ili stupnjevitim indeksom (GI), podijeljeni su u dvije glavne kategorije: postupak izvlačenja predforme i proces ekstruzije. Proces ekstruzije se dalje klasificira u skupnu ekstruziju i kontinuiranu ekstruziju. Trenutno većina dobavljača SI POF koristi kontinuirani proces ekstruzije. Za razliku od SI POF-ova, koji su pripremljeni korištenjem ekstrudera u ranim fazama njihovog razvoja, istraživanja GI POF-a započele su istraživanjem kako formirati željeni profil indeksa loma u cilindričnoj polimernoj šipki. Metoda izvlačenja predforme omogućuje preciznu kontrolu procesa izrade prilično kompliciranih profila indeksa loma. Međutim, ove tehnike nisu bile široko prihvaćene u industriji. U novije vrijeme, GI POF-ovi su također postali proizvedeni metodom ekstruzije. Konkretno, nekoliko POF tvrtki u Japanu i Sjedinjenim Državama koristi metodu difuzijske dopante, koja se može primijeniti za razne osnovne polimerne materijale.

2.6.1. Metoda izvlačenja predforme

Metoda izvlačenja predforme serijski je proces u kojem se najprije proizvodi polimerna predforma, nakon čega slijedi toplinsko uvlačenje predforme u vlakno. Shematski dijagram procesa prikazan je na slici 14. U ovoj metodi, cilindrična polimerna šipka koja se sastoji od jezgre i slojeva omotača, obično pripremljena radikalnom polimerizacijom u masi u čistom okruženju, postavlja se okomito u sredinu peći gdje se njen donji dio lokalno zagrijava do temperature izvlačenja. [29] Temperatura peći koja je prikladna za predoblik ovisi o viskoelastičnosti osnovnog polimera, koja također jako ovisi o molekularnoj težini i koncentraciji bilo kojeg korištenog aditiva. Osim toga, ovisi o tome koliko brzo vlakno treba biti proizvedeno. Vrh predforme omekšava se u peći i postupno se deformira i pada pod vlastitom težinom. Vrh se reže i izvučeno vlakno se namotava na namot. Predforma se polako spušta kroz peć. Promjer vlakna, koji se kontinuirano nadzire senzorom, može se kontrolirati brzinom dodavanja predforme i brzinom namotavanja vlakna. Iako promjer vlakna na početku neko vrijeme varira, postupno se stabilizira do željene veličine.

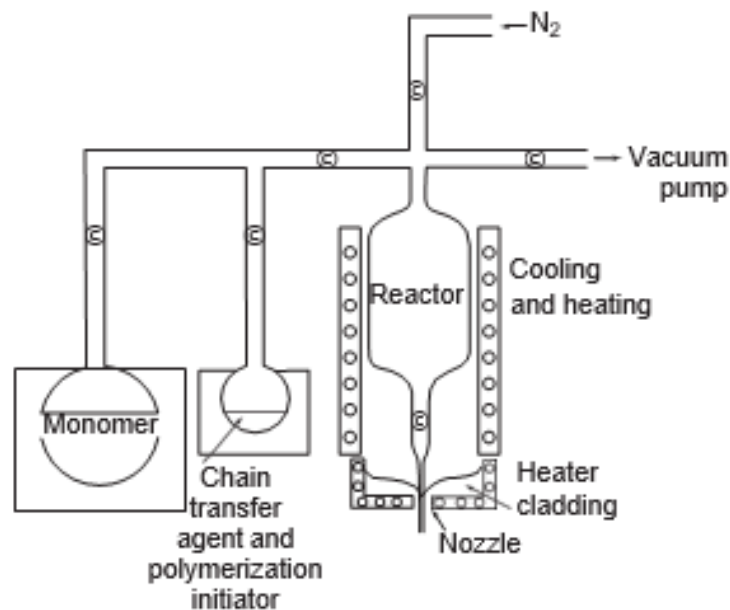


Slika 12. Proces izvlačenja predforme

Izvor: S. Mohan, V. Arjunan, Sujin P. Jose, „Fiber optics and Optoelectronic devices“, MJP Publishers, 2006.

2.6.2. Skupna ekstruzija

Proces skupne ekstruzije, koji proizvodi POF-ove u potpuno zatvorenom sustavu destilacijom monomera izvlačenjem vlakana. Slika 13. prikazuje shematski dijagram aparata. Pročišćeni monomer stavlja se u epruvetu monomera, a inicijator i sredstvo za prijenos lanca u drugu epruvetu. Obje epruvete su zapečaćene i evakuirane. Nakon ciklusa zamrzavanje–pumpa–otapanje, monomer i smjesa inicijatora i sredstva za prijenos lanca destiliraju se u reaktoru za polimerizaciju. Reaktor se zagrijava na određenoj temperaturi tijekom razdoblja dovoljnog za potpunu polimerizaciju monomera. Nakon završetka polimerizacije, reaktor se dalje zagrijava dok polimer ne postane tekućina. Suhi plin dušik koristi se za stvaranje tlaka u reaktoru, koji gura materijal kroz mlaznicu kako bi se formiralo vlakno. Vlakno se provlači kroz drugu mlaznicu gdje se oblaže polimerom za oblaganje. Na taj su način SI POF-ovi s malim gubicima uspješno proizvedeni. [29]

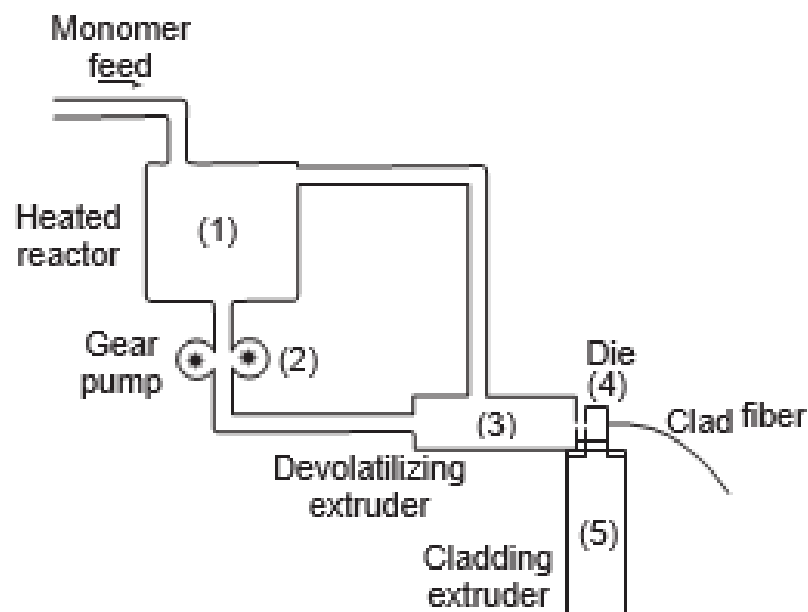


Slika 13. Proces skupne ekstruzije

Izvor: S. Mohan, V. Arjunan, Sujin P. Jose, „Fiber optics and Optoelectronic devices“, MJP Publishers, 2006.

2.6.3. Kontinuirana ekstruzija

Danas se većina SI POF proizvodi kontinuiranim postupkom ekstruzije, što uvelike poboljšava produktivnost serijske ekstruzije. Slika 14. prikazuje shematski dijagram ovog procesa, koji je prvi razvio Mitsubishi Rayon 1974. godine. U ovoj metodi, pročišćeni monomer, zajedno s inicijatorom slobodnih radikala i agensom za prijenos lanca, dovodi se u reakcijsku komoru u kojoj se odvija reakcija polimerizacije. Konverzija polimerizacije je kontrolirana na oko 60-80%. [12] Zbog prisutnosti monomera koji nije još reagirao, otopina polimera može se transportirati na znatno nižoj temperaturi od one čistog polimera. Polimerni sirup, koji će biti jezgra SI POF-a, zatim se dovodi u ekstruder za uklanjanje hlapljenja pomoću zupčaste pumpe. Preostali monomer se upari i vrati u polimerizacijski reaktor za daljnju upotrebu. Nakon toga, polimer jezgre, čija je pretvorba dosegla gotovo 100%, ulazi u matricu za koekstruziju gdje se polimer za oblaganje koji se dovodi iz zasebnog ekstrudera nanosi na polimer jezgre. Na kraju ekstrudirani polimer s jezgrom i oblogom uvlači se u vlakno.



Slika 14. Proces kontinuirane ekstruzije

Izvor: S. Mohan, V. Arjunan, Sujin P. Jose, „Fiber optics and Optoelectronic devices“, MJP Publishers, 2006.

2.7. MJERNE METODE

Karakterizacija optičkih vlakana vrlo je važna u postavljanju ili projektiranju komunikacijskih sustava optičkih vlakana i poboljšanju njihovih performansi. Razvijene su brojne mjerne metode za procjenu različitih pokazatelja učinkovitosti ili parametara optičkih vlakana. Ovo poglavlje objašnjava nekoliko metoda plastičnih optičkih vlakana (POF). [1]

2.7.1. Profil indeksa loma

Širina pojasa optičkog vlakna jako ovisi o modalnoj disperziji. Modalna disperzija se može kontrolirati kontroliranjem profila indeksa loma, koji ima odlučujući učinak na propusnost i osnovni je i važan parametar optičkih vlakana. Proširenje impulsa uzrokovano modalnom disperzijom ozbiljno ograničava brzinu prijenosa podataka multimodnih vlakana (MMF) jer preklapanje proširenih impulsa izaziva interferenciju i ometa ispravne detekcije signala, povećavajući stopu pogreške.

2.7.2. Uvjet za lansiranje

Uvjeti lansiranja značajno utječu na važne pokazatelje performansi, kao što su prigušenje i širina pojasa, MMF-a u odsutnosti sprege modova, kao i na optičku snagu spregnutu u vlakno. To je zato što uvjeti za lansiranje određuju distribuciju snage modova MMF-ova, a različiti modovi općenito imaju različite karakteristike u MMF-ovima. Uvjeti lansiranja obično se definiraju u smislu svojstava optičkog signala ubrizganog iz izvora svjetlosti u optičko vlakno. U MMF-ovima od silicijevog dioksida, raspodjela snage u stacionarnom stanju uspostavljena je u mnogim prethodnim studijama jer se očekivalo da će se MMF-ovi od silicijevog dioksida koristiti u mrežama na duge udaljenosti. [7] Distribucija snage u stacionarnom stanju zapravo je uspostavljena u MMF-ovima tijekom stvarne uporabe. Očekuje se da će MMF-ovi, posebno POF-ovi, biti prijenosni medij u mrežama velike brzine i kratkog doseg, kao što su lokalne mreže (LAN) u domovima, uredskim zgradama, bolnicama, automobilima i zrakoplovima. U takvim optičkim vezama, laserska dioda (LD) ili laser s površinskim emitiranjem okomite šupljine (VCSEL) obećavajući su kandidati za izvor svjetlosti u praktičnoj uporabi. Budući da LD ili VCSEL općenito imaju vrlo malu točku zračenja, u takvim se primjenama pobuđuju samo ograničene skupine malih modova MMF-a.

2.7.3. Atenuacija

Prigušenje ili gubitak prijenosa jedan je od najvažnijih pokazatelja učinkovitosti optičkih vlakana. Prigušenje određuje koje je najveća udaljenost prijenosa optičkih komunikacijskih sustava bez pojačala ili repetitora, kao i maksimalne izlazne snage izvora svjetlosti i minimalne osjetljivosti prijemnika. [13] Slabljenje je uglavnom uzrokovano apsorpcijom, raspršenjem i zračenjem optičke snage. Ovi učinci ovise o unutarnjim i vanjskim čimbenicima optičkih vlakana. Gubitak optičke snage zbog pojedinačnih doprinosa vrijedna je informacija za istraživače i proizvođače vlakana. S druge strane, projektantima i korisnicima sustava zanimljivije je ukupno prigušenje. Prigušenje se definira kao omjer ulazne i izlazne snage. Optička snaga eksponencijalno opada s udaljenošću dok svjetlost putuje duž vlakna. Jednadžba 3. je formula za atenuaciju gdje P_{in} je ulazna optička snaga u vlakno, P_{out} je izlazna optička snaga iz vlakna, a L je duljina vlakna.

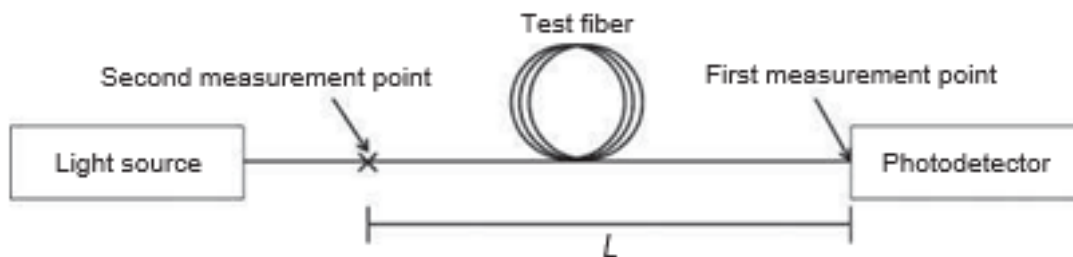
$$a = \frac{10}{L} \log \left\{ \frac{P(l_1)}{P(l_2)} \right\}$$

Jednadžba 3. Formula atenuacije

Izvor: Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018.

2.7.3.1. Cutback tehnika

Ukupno prigušenje može se odrediti cutback tehnikom. Tehnika smanjenja je najčešće korištena, ali nažalost destruktivna metoda mjerenja prigušenja jer je prilično jednostavna i prilično točna. Slika 15. shematski prikazuje eksperimentalnu postavu za mjerenje prigušenja tehnikom smanjivanja. Optička snaga se prvo mjeri na izlaznom kraju dugog vlakna, a zatim se vlakno odsiječe nekoliko metara od izlaznog kraja, a izlazna snaga se ponovno mjeri na ovom izlaznom kraju kratkog vlakna. To je zato što je iznimno teško izravno detektirati ulaznu snagu u vlakno. U tehnici smanjenja, izlazna snaga iz kratkog vlakna uzima se kao ulazna snaga za vlakno čija duljina L odgovara udaljenosti između dviju mjernih točaka. U praksi, vlakno se reže nekoliko puta kako bi se poboljšala točnost mjerenja. Uvjeti pokretanja moraju se održavati identičnim tijekom cijelog mjerenja jer različiti uvjeti lansiranja proizvode različite ulazne optičke snage u vlakno i različite distribucije snage u načinu rada, što rezultira različitim izlaznim snagama iz vlakana. [22]



Slika 15. Prikaz atenuacije mjerene cutback tehnikom

Izvor: Bejoy Antony, „Optical Communication Switching To POF Cables“, IJSTE – International Journal of Science Technology and Engineering, 2015.

2.7.4. Bandwith - širina pojasa

Širina pojasa jedan je od najvažnijih parametara optičkih vlakana, uz prigušenje. Širina pojasa određuje maksimalnu brzinu prijenosa podataka ili najveću udaljenost prijenosa. [28] Većina komunikacijskih sustava s optičkim vlaknima prihvaća pulsnu modulaciju. Ako se valni oblik ulaznog impulsa može detektirati bez izobličenja na drugom kraju vlakna, osim smanjenja optičke snage, maksimalna duljina veze ograničena je slabljenjem vlakna. Međutim, uz prigušenje optičke snage, izlazni impuls također će općenito biti vremenski širi od ulaznog impulsa. Ovo širenje impulsa ograničava prijenosni kapacitet. Širina pojasa određena je impulsnim odzivom na sljedeći način. Optička vlakna se obično smatraju kvazi-linearim sustavima. Jednadžba 4. je formula za širinu pojasa gdje se izlazni impuls $P_{out}(t)$ iz vlakna može izračunati u vremenskoj domeni ulaznog impulsa $P_{in}(t)$ i funkcije impulsnog odziva $h(t)$ vlakna.

$$p_{out}(t) = h(t) * p_{in}(t).$$

Jednadžba 4. Formula za širinu pojasa u vremenskoj domeni

Izvor: Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018

Fourierova transformacija jednadžbe daje jednostavan izraz kao produkt u frekvencijskoj domeni:

$$P_{out}(f) = H(f)P_{in}(f),$$

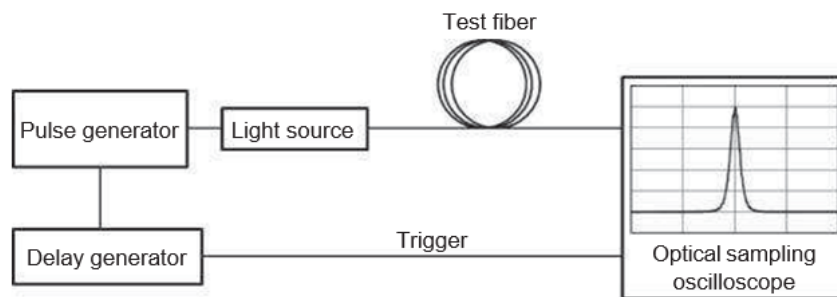
Jednadžba 5. Formula za širinu pojasa u frekvencijskoj domeni

Izvor: Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018.

gdje je $H(f)$ funkcija prijenosa snage vlakna na frekvenciji osnovnog pojasa f . Funkcija prijenosa snage definira širinu pojasa optičkog vlakna kao najnižu frekvenciju na kojoj se $H(f)$ smanjuje na polovicu svoje DC vrijednosti. Širina pojasa vlakna često se naziva širinom pojasa od -3 dB jer je poluvrijednost -3 dB. [14] Funkcija prijenosa snage lako se izračunava iz Fourierove transformacije eksperimentalno izmjerenih ulaznih i izlaznih impulsa u vremenskoj domeni ili iz izmjerene izlazne snage iz vlakna u frekvencijskoj domeni od DC do frekvencije širine pojasa.

2.7.4.1. Mjerenje propusnosti u vremenskoj domeni

Idealno mjerenje propusnosti u vremenskoj domeni izravno daje impulsni odziv vlakna. Međutim, izravno mjerenje impulsnog odziva je nepraktično jer idealan signal delta funkcije nije dostupan. [34] Stoga je jednostavan postupak za mjerenje propusnosti ilustriran na slici 16. Uzak svjetlosni impuls iz izvora svjetlosti, obično lasera, ubrizgava se u ispitno vlakno, a valni oblik proširenog izlaznog impulsa iz vlakna detektira se i bilježi optičkim osciloskopom za uzorkovanje. Valni oblik izlaznog pulsa iz kratkog referentnog vlakna, koji se smatra valnim oblikom ulaznog pulsa u vlakno za ispitivanje, također se mjeri na isti način. Električni okidački signal s prikladnim kašnjenjem za duljinu vlakna koristi se za otkrivanje optičkog pulsa osciloskopom. Funkcija prijenosa snage ispitivanog vlakna izračunava se jednadžbom Fourierove transformacije izmjerenih valnih oblika ulaznog i izlaznog impulsa. Širina pojasa vlakna određena je najnižom frekvencijom na kojoj se dobivena funkcija prijenosa snage smanjuje na polovicu svoje maksimalne vrijednosti. Budući da širina pojasa MMF-a jako ovisi o uvjetima lansiranja, mora se specificirati uvjet usvojen u mjerenju.



Slika 16. Prikaz mjerenja propusnosti u vremenskoj domeni

Izvor: Bejoy Antony, „Optical Communication Switching To POF Cables“, IJSTE – International Journal of Science Technology and Engineering, 2015.

2.8. MJERNI INSTRUMENTI

2.8.1. OTDR – Optical Time Domain Reflectometer

Optički reflektometar u vremenskoj domeni (OTDR) je uređaj koji ispituje cjelovitost optičkog kabela i koristi se za izgradnju, certificiranje, održavanje i rješavanje problema optičkih sustava. Ručni OTDR-ovi stvaraju virtualnu sliku optičkog kabela kako bi odredili stanje i performanse optičkog kabela. Ovi alati također mogu testirati komponente duž putanje kabela kao što su spojne točke, zavoji ili spojevi kako bi se analizirala sposobnost kabela od početka do kraja. Proces izvođenja ovih testova zahtijeva da OTDR alat unese svjetlosni impuls u jedan kraj optičkog kabela. Rezultati se temelje na reflektiranom signalu koji se vraća na isti OTDR priključak. Dio svjetla koje se prenosi kroz kabel će se raspršiti, a dio će se reflektirati i vratiti u OTDR. Ova vraćena raspršenost i refleksije se mjere kako bi se prikupile korisne informacije o kabeu, kao što su gubici i udaljenosti do konektora ili kvarova. To se mjeri bilježenjem vremena potrebnog da se signali vrate u OTDR. [12]

Uz toliko različitih upotreba OTDR testiranja, postavljanje ispravnih OTDR parametara može osigurati točnost testova koji se izvode i mjerenja koja dolaze. Za neke testove korištenje funkcije automatskog testiranja može biti dovoljno da dođu točni rezultate, ali drugi mogu zahtijevati da se ručno postave parametri testiranja OTDR-a na temelju duljine optičkog kabela, vrste kabela i složenosti sustava. [12] Ovi OTDR parametri prilagodit će širinu impulsa, vrijeme usrednjavanja, mrtve zone i raspon udaljenosti za zadani niz vlakana kako bi ponudili najtočnije rezultate. Na slici 17. je prikazan OTDR uređaj.



Slika 17.Slika OTDR-a

Izvor: Alan E. Willner, „Optical Fiber Telecommunications VII“, AP, 2020

2.8.2. Uređaj za fuzijsko spajanje

Fuzijsko spajanje je postupak zavarivanja krajeva dvaju optičkih vlakana uz pomoć električnog luka. Luk se precizno primjenjuje kako bi spojio dva vlakna tako da svjetlost pravilno prolazi kroz vlakna, umjesto da se raspršuje ili odbija natrag od spoja. Spajanje optičkog kabela zahtijeva dodatnu zaštitu spoja. Korištenjem termoskupljanja koje omogućuje da spoj i područje koje ga okružuje budu jači od izvornog vlakna, ovo je učinkovita metoda dodavanja sigurne zaštite. Spajanje vlakana fuzijom nudi dugoročnu pouzdanost, kao i brz i jeftin proces. Prednosti spajanja fuzijom je kompaktna uporaba, nudi bolje performanse, i visoku mehaničku čvrstoću. Podnosi ekstremno visoke promjene temperature, nudi trajnu i brzu primjenu i sprječava ulazak prašine i drugih onečišćenja u optički put. [9] Učinkovitost spajanja uvelike ovisi o kvaliteti cijepanja, pa se preporučuje visokoprecizan nož za cijepanje. Na 18. slici je prikazan uređaj za fuzijsko spajanje.



Slika 18. Uređaj za fuzijsko spajanje

Izvor: Alan E. Willner, „Optical Fiber Telecommunications VII“, AP, 2020

2.8.3. Optički atenuator

Optički atenuator je pasivni uređaj koji se koristi za smanjenje razine snage optičkog signala. Krug prigušivača omogućit će smanjenje poznatog izvora energije za unaprijed određeni faktor, koji se obično izražava u decibelima. Optički atenuatori općenito se koriste u jednomodnim primjenama na dugim relacijama kako bi se spriječilo optičko preopterećenje prijemnika. Optički atenuatori koriste nekoliko principa kako bi postigli željeno smanjenje snage. Prigušivači mogu koristiti tehniku gubitka praznine, apsorpcijsku ili reflektivnu tehniku kako bi postigli željeni gubitak signala. [5] Tipovi prigušivača koji se općenito koriste su fiksni, postupno promjenjivi i kontinuirano promjenjivi. Načelo gubitka razmaka koristi se u optičkim atenuatorima za smanjenje razine optičke snage umetanjem uređaja u stazu vlakana pomoću inline konfiguracije. Apsorpcija je odgovorna za postotak gubitka snage u optičkom vlaknu. [5] Ovaj gubitak se ostvaruje zbog nesavršenosti optičkog vlakna koje apsorbira optičku energiju i pretvara je u toplinu. Načelo refleksije ili raspršenja, odgovorno je za većinu gubitka snage u optičkom vlaknu i opet je zbog nesavršenosti optičkog vlakna, koje u ovom slučaju uzrokuju raspršenje signala. Na 19. slici je prikazan optički atenuator.

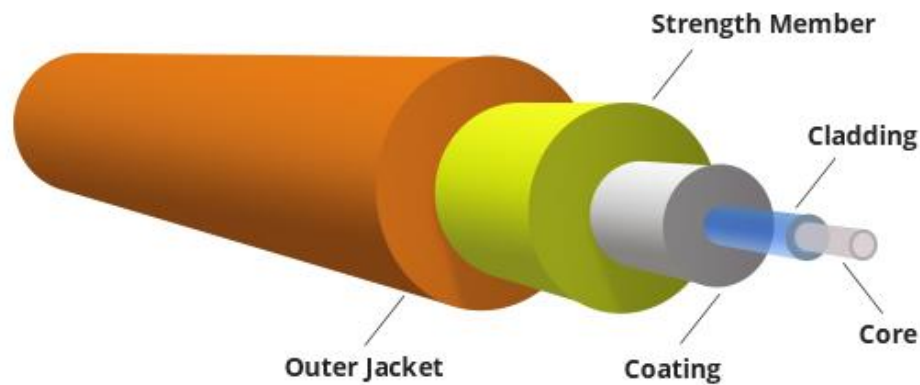


Slika 19. Optički atenuator

Izvor: <https://www.thunder-link.com/it/sc-apc-5db-mf-attenuator.html>

3. POF KABELI

Plastična optička vlakna POF izrađena su od visoko prozirnih polimera kao što su polistiren (PS), polimetil metakrilat (PMMA) i polikarbonat (PC). Plastična optička vlakna su lagana, fleksibilna i otpornija na oštećenja, vibracije i savijanje. Plastično optičko vlakno ima izvrsnu vlačnu čvrstoću, izdržljivost i malu površinu. Ove prednosti čine uspješnu primjenu plastičnih optičkih vlakana. Plastična optička vlakna se ne koriste samo u zadnjih 100-1000 metara pristupne mreže, već se također mogu koristiti u raznim vozilima, zrakoplovima i drugim prijevoznim sredstvima. [19] Unutrašnjost tipičnog luksuznog automobila sastoji se od najmanje nekoliko kilometara bakrenih žica i kabela, što uvelike povećava težinu i cijenu. To vrijedi za avione, vlakove i sva druga prijevozna sredstva. Što je veća frekvencija prijenosa, niži su troškovi korištenja plastičnih optičkih vlakana. Kabel od plastičnih vlakana ne stvara zračenje i potpuno je otporan na elektromagnetske smetnje, radiofrekvencijske smetnje. Plastična optička vlakna mogu se polagati jedno uz drugo s bakrenim kabelima u istom kanalu ili u istom kabelskom snopu. Plastična optička vlakna ne stvaraju buku i neće negativno utjecati na trenutnu mrežu cijevi. [19] Na slici 20. prikazana je struktura POF kabela.



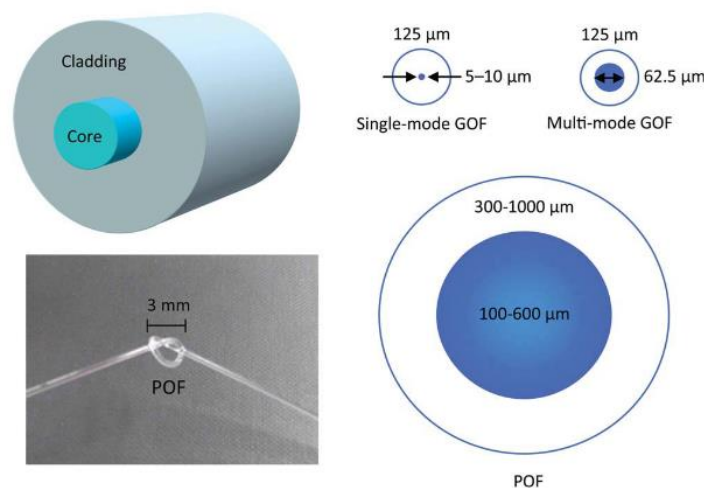
Slika 20.Slika strukture POF kabela

Izvor: https://www.jyft.top/new_detail/nid/45174.html

3.1. STRUKTURA KABELA

Kabel od optičkih vlakana sadrži tri osnovne komponente: jezgru, koja prenosi svjetlosne signale, omotač koji okružuje jezgru s nižim indeksom loma i sadrži svjetlost i premaz koji štiti krhku jezgru i oblogu unutar nje. Jezgra je unutarnji dio vlakna koji vodi svjetlost, dok omotač u potpunosti okružuje jezgru. Indeks loma jezgre malo je veći od indeksa loma ovojnice. Stoga, kada je upadni kut ulazne svjetlosti u jezgru veći od kritičnog kuta, ulaz je ograničen na područje jezgre zbog potpune unutarnje refleksije na sučelju između različitih dielektričnih materijala koji čine svaki sloj. [5] Iako je ovaj jednostavan koncept koristan za vođenje svjetlosti u mnogim vrstama vlakana, on ne daje potpuno objašnjenje. Svjetlost je zapravo elektromagnetski val s frekvencijom. Optičko vlakno vodi valove u različitim obrascima koji se nazivaju modovi, a koji opisuju distribuciju svjetlosne energije preko valovoda. Jezgra koja nosi svjetlost je najmanji i najvažniji dio optičkog vlakna. [5] Jezgra optičkog vlakna izrađena je od plastike. Plastične jezgre optičkih vlakana mogu biti mnogo veće od staklenih. Popularna veličina plastične jezgre je 980 μm . [18]

Moguće su mnoge kombinacije veličina jezgre i obloge. Kako bi se osiguralo da se konektori i oprema mogu ispravno uskladiti, potrebno je imati standarde. Kada se radi o tako malim komponentama kao što su one koje se koriste u optičkim vlaknima, gdje čak i male neusklađenosti mogu ugroziti cijeli sustav. [19] ITU standardi primjenjivi su na jednomodna optička vlakna i kabele. Na slici 21. prikazan je POF kabel u presjeku.

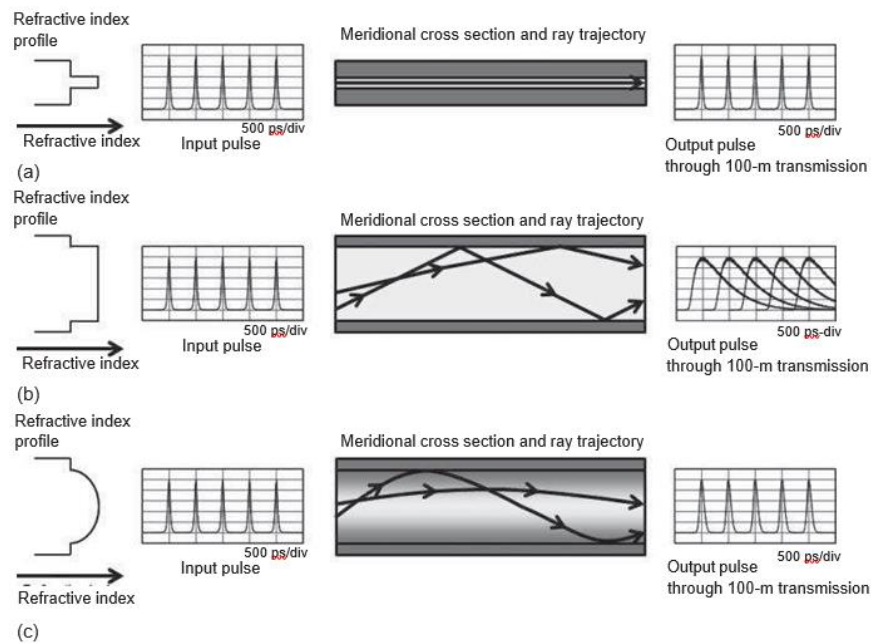


Slika 21. Prikaz POF kabela u presjeku

Izvor: <https://www.edn.com/running-ethernet-over-plastic-optical-fiber/>

3.2. VRSTE POF KABELA

Optička vlakna se klasificiraju u dvije vrste: SMF (Single mode fiber) i MMF (Multimode fiber). Jednmodna nit dizajnirana je za propagiranje jednog svjetlosnog moda, dok višemodna nit podržava višestruke istovremene svjetlosne modove. Ova razlika utječe na propusnost, udaljenost prijenosa signala i stabilnost signala. SMF i MMF se opet dijele u dvije klase: niti s stepenastim indeksom (SI) i niti s stupnjevanim indeksom (GI). Nit s stepenastim indeksom ima konstantan indeks loma u cijeloj jezgri. Nit s stupnjevitim indeksom ima gotovo paraboličnu raspodjelu indeksa loma. Indeks loma postupno se smanjuje kao funkcija radijalne udaljenosti od središta jezgre. Slika 22. prikazuje indeks loma i putanje zraka u SMF i u SI i GI MMF, te prikazuje izmjerene valne oblike ulaznih i izlaznih impulsa. Najznačajnija razlika među ovim vrstama vlakana je modalna disperzija. [24]



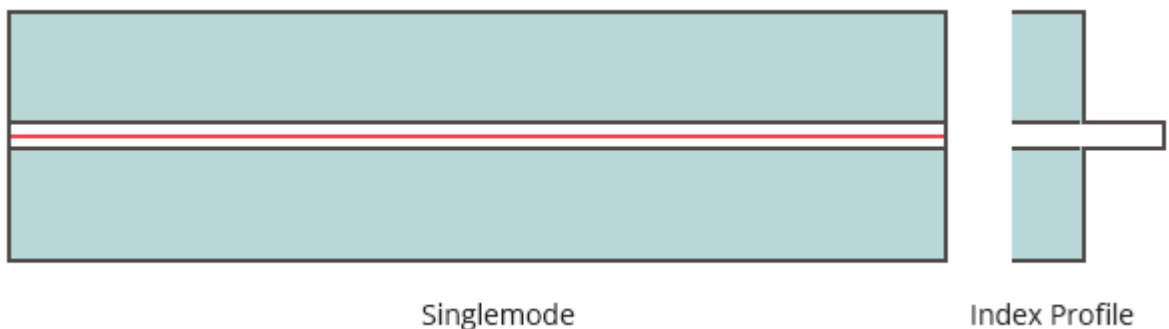
Slika 22. Prikaz indeksa loma

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Indeks_loma

3.2.1. Jednomodni optički kabel

Jednomodni optički kabeli imaju tanku jezgru i dopuštaju samo jedan podatkovni način, za razliku od multi-moda, koji može koristiti nekoliko različitih načina. Jednomodni kabeli pružaju veću brzinu prijenosa i mogu prenijeti signal 50 puta dalje od višemodnih, ali su i skuplji. Uža jezgra u jednomodnom kabelu i njegova upotreba jednog svjetlosnog vala osigurava najmanje slabljenje signala i najveće brzine među različitim vrstama dostupnih optičkih kabela. Njegovi najveći nedostaci su što mu je potreban izvor svjetlosti uskog spektralnog raspona, a može koristiti samo jedan način prijenosa.

"Mod" u optičkom kabelu odnosi se na put kojim svjetlost putuje. Jednomodno vlakno ima manji promjer jezgre od 9 mikrona (točnije 8,3 mikrona) i dopušta samo jednu valnu duljinu i put za putovanje svjetlosti, što uvelike smanjuje refleksiju svjetlosti i slabljenje. [28] Nešto skuplji od svojih višemodnih optičkih kabela, jednomodni optički kabel često se koristi u mrežnim vezama na velikim duljinama. Slika 23. prikazuje jednomodnu nit.

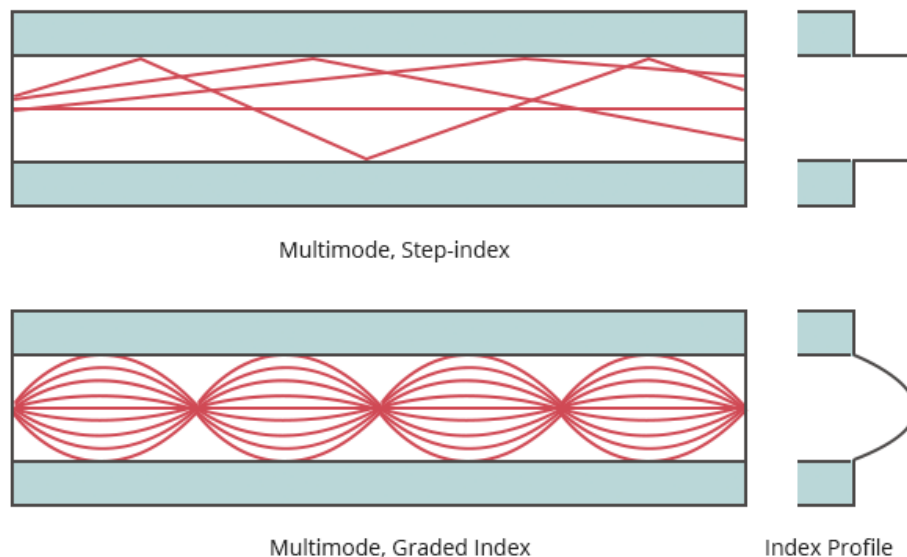


Slika 23. Prikaz jednomodne niti

Izvor: John R. Vacca, „Optical Networking Best Practices Handbook“, Wiley, 2007.

3.2.2. Višemodni optički kabel

Višemodni optički kabeli imaju deblju jezgru od jednomodnih. Mogu nositi podatke koji su kodirani korištenjem više izvora svjetlosti. To omogućuje slanje više signala na jednom kabelu. Višemodno optičko vlakno dostupno je u dvije veličine, 50 mikrona i 62,5 mikrona. [29] Vlakna pružaju veliku propusnost pri velikim brzinama na kratkim do srednjim udaljenostima. Nedostatak višemodnog kabela je taj što se zbog više tokova podataka signal rasipa na veće udaljenosti, što rezultira nepotpunim i nepreciznim prijenosom podataka. Obično se koristi za kratke udaljenosti, uključujući aplikacije patch kabela kao što su optička vlakna za radnu površinu ili patch panel za opremu, podatkovne i audio/video aplikacije u LAN-ovima. Prema raspodjeli indeksa loma vlakna, višemodno vlakno se može podijeliti u dvije vrste: višemodno vlakno stepenastog indeksa i višemodno vlakno stupnjevanog indeksa. [29] Na slici 24. je prikazana višemodna nit.



Slika 24. Prikaz višemodne niti

Izvor: John R. Vacca, „Optical Networking Best Practices Handbook“, Wiley, 2007.

3.2.3. Plastična optička vlakna

Plastična optička vlakna obično nemaju dovoljno čistoće za prijenos signala potrebnih za veće mreže optičkih vlakana, ali se mogu koristiti u malim mrežama. Od kasnih 1990-ih njihova uporaba u mrežama polako raste. Međutim, češće se koriste u igračkama ili ukrasnim zaslonima koji proizvode svjetlosne signale. Primjer za to je elektronička reprodukcija vaze s cvijećem, pri čemu je cvijeće zamijenjeno optičkim vlaknima. [5] POF je optičko vlakno sa stepenastim indeksom jezgre i tipičnog promjera od 1 mm. Velika veličina jezgre omogućuje mu jednostavno spajanje puno svjetla iz izvora i konektora koji ne moraju biti visoke preciznosti. Tipični troškovi konektora su 10-20% kao i za staklena vlakna, a završavanje je jednostavno. [20] Budući da je plastičan, izdržljiviji je i može se postaviti za nekoliko minuta uz minimalan alat i obuku. Za aplikacije koje ne zahtijevaju veliku propusnost na velikim udaljenostima, POF je konkurentniji, što ga čini održivom opcijom za LAN veze i kratke veze niske brzine.

4. PRIMJENA

U posljednjem desetljeću širokopojasna komunikacijska tehnologija koja koristi optička vlakna brzo se proširila preko internetskih linija i kablanske TV linije do kuće. Sve je to zbog jeftinije cijene optičkih vlakana koja ostvaruju brzinu prijenosa koju zahtijevaju te usluge. Sada se vjeruje da će količina informacija koje će biti potrebno prenijeti u području automobilske tehnologije brzo rasti u bliskoj budućnosti, ne samo u informacijskim sustavima, već i u kontrolnim i sigurnosnim sustavima.

4.1. POMORSTVO

Učinkovita tehnologija očitavanja i detekcije ključna je za osiguravanje pomorske sigurnosti, sprječavanje onečišćenja, održavanje ekološke ravnoteže i praćenja u stvarnom vremenu. Princip, sustav i karakteristike senzorske tehnologije optičkih vlakana igraju važnu ulogu u promicanju snažnog promicanja tehnologije senzorskih optičkih vlakana u oceanu. Otkako je Corning prvi put razvio optičko vlakno sa stopom gubitka snage od 0,2 dB/km koristeći kvarc visoke čistoće 1970.godine, komunikacijska tehnologija optičkog vlakna brzo se razvila, a različiti optički uređaji i optoelektronički uređaji uspješno su razvijeni i poboljšani. Tehnologija se u skladu s tim brzo razvijala. [16] U usporedbi s tradicionalnom senzorskom tehnologijom, senzorska tehnologija optičkih vlakana ima sljedeće prednosti [2]: ima veliku brzinu odziva i visoku osjetljivost; široku propusnost frekvencije detekcije i veliki dinamički raspon; vlakna imaju veliku pouzdanost i dugi radni vijek; optička vlakna ne primaju elektromagnetske smetnje; otporna su na koroziju, mogu raditi u teškim okruženjima; imaju veliku udaljenost prijenosa; male su veličine i lako se pakiraju u senzore različitih oblika. Trenutno najčešće korištene tehnologije senzora optičkih vlakana uključuju tehnologiju senzora optičkih vlakana Braggove rešetke, tehnologiju senzora distribuiranih optičkih vlakana temeljenu na raspršenoj svjetlosti, tehnologiju senzora optičkih vlakana temeljenu na principu interferencije i tehnologiju senzora optičkih vlakana temeljenu na spektralnoj apsorpciji. [8] Primjena plastičnih optičkih vlakana koristi se u sensorima vibracija i razini vode od optičkih vlakana koji se koriste u praćenju potresa i tsunamija u podmorju.

4.2. AUTOMOBILSKA INDUSTRIJA

POF zamjenjuje bakar početkom stoljeća i koristi se u putničkom prostoru za multimedijске aplikacije. Prednosti za proizvođače automobila su jasne: POF nudi visoku radnu širinu pojasa, povećanu sigurnost prijenosa, malu težinu, otpornost na elektromagnetske smetnje i lakoću rukovanja i instalacija. Ovaj standard sabirnice vozila naziva se medijski orijentirani prijenos sustava (MOST). Temelji se na sinkronoj podatkovnoj komunikaciji i koristi se za prijenos multimedijских signala preko polimernog optičkog vlakna ili putem električnih vodiča. Tehnologiju je razvila i standardizirala MOST Cooperation osnovana 1998. [1] Od tada se MOST tehnologija koristi u gotovo svim većim proizvođačima automobila u svijetu, kao što su VAG grupa, Toyota, BMW, Mercedes-Benz, Ford, Hyundai, Jaguar i Land Rover. Trenutno na tržištu postoji više od 50 različitih tipova automobila koji koriste POF u mrežnoj strukturi putničke kabine za multimedijске podatkovne usluge. Osnovna arhitektura MOST mreže je logički prsten koji se sastoji do 64 uređaja (čvorova). Najnovija MOST specifikacija preporučuje brzinu uzorkovanja od 48 kHz. Točna brzina prijenosa podataka ovisi o brzini uzorkovanja sustava. Jedan za drugim Timing Slaveovi na logičkom prstenu primaju signal, analiziraju okvir, obrađuju željene informacije, dodaju informacije u slobodne utore u okviru i prenose okvir svom nasljedniku. Budući da je MOST sustav potpuno sinkroniziran, sa svim uređajima spojenim na sabirnicu koji su sinkronizirani, nije potrebno spremanje memorije u međuspremnik. MOST sadrži optički primopredajnik gdje se primljeni svjetlosni signali pretvaraju u električnu domenu, obrađuju, pretvaraju natrag u optičku domenu i prosljeđuju dalje. MOST okvir uključuje jedno područje za sinkroni prijenos strujanja podataka (audio i video podaci), jedno područje za asinkroni prijenos paketnih podataka (TCP/IP paketi ili konfiguracijski podaci za navigacijski sustav) i jedno područje za prijenos kontrolnih podataka. [1] Sljedeća MOST generacija koristi bit rate od nešto ispod 50 Mbit/s za udvostručenje propusnosti. Na slici 25. prikazan je MOST sustav.



Slika 25.Prikaz MOST sustava

Izvor: Andreas Weinert, Torsten Seftig, „Fiber Optics“, Leoni, 2020.

4.3. KUĆANSTVO

S porastom implementacije Fiber to the Home (FTTH) i u Europi i u SAD-u operateri moraju ponuditi sve veće i veće brzine pristupa kućanstvu. U Europi se potrošačima nude brzine od minimalno 50 Mbps do 1 Gbps, a najčešće su brzine od 100 do 300 Mbps. U SAD-u su mnogi potrošači svjesni brzina od 1 Gbps uglavnom zahvaljujući Googleu i drugim tvrtkama koje se natječu za kupce nudeći sve veće i veće brzine pristupa internetu. [16] U kući potrošači povezuju sve više uređaja međusobno i s internetom. Ovo povećanje broja uređaja rezultira prenatrpanom mrežom koje mora podnijeti sav promet između uređaja i interneta. Većina uređaja u domu, uključujući tablete, pametne telefone i pametne televizore povezana je putem WiFi mreže.

Optička vlakna imaju prednost pred bakrenim kabelom u tome što se optička vlakna mogu smjestiti u iste kanale kao i glavni kabeli jer vlakna nisu električki vodljiva. To znači da potrošači ne moraju instalirati skupe nove kanale ili polagati vlakna izvan zida. Najveći izazov s ovim kućnim mrežnim rješenjem je taj što većina mrežnih uređaja nije optički omogućena, pa je za povezivanje mrežnih uređaja s optičkom mrežom potreban optički konverter. Plastično optičko vlakno ili POF je jeftino i visoko tolerantno na savijanje što ga čini jednostavnim za instalaciju. Budući da je ograničen na brzine do 10 Gbps, POF nije "otporan na budućnost" kao staklena vlakna. Iako ovo može biti zabrinjavajuće, većina industrijskih predviđanja ne vidi potrebu za brzinama iznad 10 Gbps barem 10 do 15 godina. [9] Idealno kućno mrežno rješenje je ono koje kombinira prednosti POF-a s jednostavnom instalacijom WiFi pristupnih točaka raspoređenih po cijelom domu. POF se lako može ugraditi u glavne kanale u cijelom domu, bez obzira na to jesu li namjenski telekomunikacijski kanali dostupni ili ne. Mobilni uređaji koji se spajaju na mrežu putem WiFi-a nastaviti će koristiti tu vezu, ali će uživati u brzini od 1 Gbps POF mreže. POF je lako dostupan na većini tržišta, budući da ga je u Europi standardizirao ETSI i IEEE u ostatku svijeta.



Slika 26. Prikaz digitalne mreže

Izvor: Makoto Asai, Yasuhiro Koike „The future of plastic optical fiber“, Asia materials, 2014.

4.4. ZRAKOPLOVSTVO

Upotreba POF-a kao prijenosnog medija za zrakoplove predmet je istraživanja različitih skupina za istraživanje i razvoj zbog njegovih specifičnih prednosti. Upotreba POF multimedijjskih vlakana čini se mogućim za buduće primjene u zrakoplovima. Tvrtka Boeing razvija posebne mjerne postavke za istraživanje i analizu POF-ova za primjenu u uvjetima svakodnevnog uporabe u zrakoplovima. Mala težina te jednostavno i ekonomično rukovanje čine ovu vrstu vlakana prvim izborom. No za sada su brzine prijenosa podataka i temperaturni raspon preniski da bi zamijenili bakar za multimedijjske svrhe. Kako bi izgradili zrakoplove manje težine, svi veliki proizvođači zrakoplova koristit će karbonska vlakna za tijelo zrakoplova u svim novim modelima zrakoplova. Zbog svojih boljih performansi težine, zrakoplov će izgubiti dosta svoje otpornosti na EMV i svemirsko zračenje. Korištenje optičkih kabela poput staklenih vlakana ili polimernih vlakana dobar je pristup za zaobilazanje problema EMV-a u prijenosu signala. Jedno od nadolazećih rješenja bit će zamjena električnih bakrenih kabela POF-om i primjena protokola sabirnice FlexRay ili MOST koji se široko koristi u automobilske industriji.

U zrakoplovstvu se uvode strogi ispitni postupci za visoko pouzdan rad svih komponenti sustava. Mora se uzeti u obzir rad na visokim i niskim temperaturama počevši od -60°C do $+130^{\circ}\text{C}$. [33] Također je potrebna visoka stabilnost na vibracije u slučaju korištenja optičkih konektora. Za relevantnu upotrebu sustava u zrakoplovu, potrebno je dizajnirati kabel u zrakoplovu za POF upotrebu otporan na vatru i toplinu i da je vodootporan. Visokotemperaturni POF mora biti implementiran kako bi se omogućio stabilan rad na temperaturama u zrakoplovu do $+130^{\circ}\text{C}$, što se može dogoditi u jedinici sustava kokpita. Za implementaciju MOST tehnologije u zrakoplovu u kabini za korištenje multimedije, može se koristiti uobičajeno standardno vlakno zbog nerelevantnog utjecaja sustava multimedijjskog pružanja putnicima. Do sada je upotreba POF-a u zrakoplovu bila usmjerena na istraživačko područje i trebat će godine da se testira pouzdanost za svakodnevnu upotrebu u industriji zrakoplova.

4.5. MEDICINA

Plastična optička vlakna najčešće se koriste u endoskopiji. Endoskopija nudi dodatnu mogućnost dosezanja unutar ljudskog tijela na minimalno invazivan način. Endoskopi su imali koristi od tehnologije optičkih vlakana, jer koriste optička vlakna za osvjetljavanje svoje slike. Neki uređaji također koriste vlakna za obavljanje laserske operacije na daljinu. Endoskopi s optičkim vlaknima i laserska vlakna imaju industrijsku primjenu npr. inspekciju cijevi ili kanala do kojih je teško doći na druge načine. Sustavi rasvjete od optičkih vlakana također se mogu postaviti u jaka magnetska polja, kao što je u blizini MRI uređaja, i mogu se koristiti u samostalnim aplikacijama na ovaj način. [12] Dok vlaknasti senzori imaju širu industrijsku primjenu, posebno na teško dostupnim mjestima i opasnim područjima gdje postoji opasnost od električnih iskri koje mogu izazvati eksplozije. Upotreba optičkih vlakana u endoskopiji je možda najznačajnija primjena optičkih vlakana u području medicine. Od encefaloscopa, koji se koriste za pregled šupljina u mozgu, do artroskopa, koji se koriste za dijagnosticiranje i liječenje problema s koljenima, ovim se uređajima može izravno ispitivati ljudsko tijelo.

5. ZAKLJUČAK

Optička komunikacija je međunarodno prihvaćena komunikacija za komunikaciju na daljinu. Budući da je to pouzdan način komunikacije, može se implementirati u komunikaciji na kratke udaljenosti. Pojam komunikacije na kratke udaljenosti obično se definira za pomorstvo, kućne veze, automobilsku industriju, medicinu, zrakoplovstvo. Za komunikaciju na kratke udaljenosti potreban je prijenosni medij niske cijene, velike brzine i velikog kapaciteta. Otprilike u zadnjih 20 godina plastična optička vlakna postala su standard zamjenom „starih i velikih“ bakrenih krugova u industriji. U telekomunikaciji i računalnim mrežama plastična optička vlakna su nezamjenjiva zbog svojih jednostavnosti i brzog prijenosa podataka. Prednosti su u jednostavnoj instalaciji u zahtjevne sustave, elektromagnetska polja ne utječu na rad optičkog vlakna i krugovi su malih dimezija. Glavni ciljevi u budućnosti kojima se treba pozabaviti su poboljšana brzina prijenosa podataka i bolja kvaliteta usluge. U ovom radu je opisana povijest, gubici prijenosa i prijenosni kapacitet. Navedeni su materijali od kojih su vlakna napravljena. Mjerne metode i mjerni instrumenti su prikazani i objašnjeni. Kabeli podijeljeni na strukturu i na vrste kabela. Prikazana je primjena plastičnih optičkih vlakana u pomorstvu, automobilskoj industriji, kućanstvu, zrakoplovstvu i medicini.

LITERATURA

- [1] Markus Beckers, and Tobias Schlüter, a Thomas Vad, a Thomas Griesa and Christian-Alexander Bunge „An overview on fabrication methods for polymer optical fibers“, Wiley Online Library, 2014.
- [2] Casimer DeCusatis and Carolyn J. Sher DeCusatis „Fiber Optic Essentials“, Elsevier, 2006.
- [3] Ulrich H.P. Fischer and Matthias Haupt, „Optical Transmission Systems Using Polymeric Fibers“, ResearchGate, 2011.
- [4] John R. Vacca, „Optical Networking Best Practices Handbook“, Wiley, 2007.
- [5] Olaf Ziemann and Jürgen Krauser and Peter E. Zamzow and Werner Daum, „POF Handbook – Optical Short Range Transmission Systems – Second Edition“, Springer, 2008.
- [6] Jeffrey Lee, „Discrete Multitone Modulation for Short-Range Optical Communications“, Proefschrift, 2009.
- [7] Casimer DeCusatis, „Handbook of Fiber Optic Data Communication – Fourth Edition“, Elsevier, 2014
- [8] Yasir Beeran Pottathara, Sabu Thomas, Nandakumar Kalarikkal, Yves Grohens, Vanja Kokol, „Nanomaterials Synthesis – Design, Fabrication and Applications“, Elsevier, 2019
- [9] Hamid Alemohammad, „Opto – Mechanical Fiber Optic Sensors“, Elsevier, 2018.
- [10] R.J Crawford, P.J Martin, „Plastics Engineering“, Elsevier, 2020.
- [11] Christian – Alexander Bunge, Thomas Gries and Markus Beckers, „Polymer Optical Fibres“, Elsevier, 2016.
- [12] Andreas Weinert, Torsten Sefzig, „Fiber Optics“, Leoni, 2020.
- [13] Thorlabs, „Graded-Index polymer Optical Fiber“, 2019
- [14] IEE 802.3 Ethernet Working Group, „Gigabit over Plastic Optical Fibre“, 2016
- [15] Andreas Weinert, Torsten Sefzig, „Inovative Fiber Optics Solutions“, Leoni, 2020.
- [16] Andreas Weinert, Torsten Sefzig, „Cables for naval shipbuilding“, Leoni, 2021.
- [17] Andreas Weinert, Torsten Sefzig, „Inovative Fiber Optics Solutions“, Leoni, 2020.

- [18] Andreas Weinert, Torsten Sefzig, „Low fire hazard cables complying with the EU Construction Products Regulation“, Leoni, 2020.
- [19] Yoshirio Tsukamoto, „Plastic optical fiber standard“, Mitsubishi Rayon CO.,2014
- [20] Ankush Sharma, Paras Malhotra, „Optical Fiber Cable“, Nokia Siemens Network, 2013
- [21] Mukesh Kumar Singh, Annika Singh, „Characterization of Polymers and Fibers“, Elsevier, 2020.
- [22] S. Mohan, V. Arjunan, Sujin P. Jose, „Fiber optics and Optoelectronic devices“, MJP Publishers, 2006.
- [23] Alan E. Willner, „Optical Fiber Telecommunications VII“, AP, 2020.
- [24] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki, „Optical Network – Third Edition“, MK – Morgan Kaufmann, 2010.
- [25] Nithin Kundachira Subramani, Siddaramaiah H. And Joong Hee Lee, „Polymer – based advanced functional composites for optoelectronic and energy applications“, Elsevier, 2021.
- [26] Makoto Asai, Yasuhiro Koike „The future of plastic optical fiber“, Asia materials, 2014.
- [27] Sulaiman Wadi Harun and Hamzah Arof, „Current developments in optical fiber technology“, In Tech, 2013.
- [28] Silvio Abrate, Roberto Gaudino and Guido Perrone, „Step - Index PMMA Fibers and Their Applications“, INTECH, 2013.
- [29] Yasuhiro Koike, Kataro Koike, „Progress in Low-Loss and High-Bandwidth Plastic Optical Fibers“, Polymer Physics, 2010.
- [30] AL – Zubaidi – SI-POF „Supporting Power Over Fiber in Multi – Gbit/s Transmission for In- Home Networks“, Lightwave Technology, 2015.
- [31] Bejoy Antony, „Optical Communication Switching To POF Cables“, IJSTE – International Journal of Science Techology and Engineering, 2015.

Izvori s interneta:

- [32] <https://www.lumitex.com/blog/optical-fiber-technology> (25.7.2022.)
- [33] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plastic-optical-fibers>
(25.7.2022.)
- [34] <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/02/24/2391498/28124/en/Insights-on-the-Fiber-Optics-Global-Market-to-2027-by-Cable-Type-Optical-Fiber-Type-Application-and-Region.html>
(26.7.2022.)
- [35] <https://i-fiberoptics.com/basics.php> (1.8.2022.)
- [36] <https://www.hca.hitachi-cable.com/products/hca/paper/choosing-fiber-optic-cable.php> (1.8.2022.)
- [37] <https://www.leoni-fiber-optics.com/en/applications/marine-maritime/>
(7.8.2022.)
- [38] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6832#ad-image-13 (7.8.2022.)
- [39] https://www.jyft.top/new_detail/nid/45174.html (15.8.2022.)
- [40] https://www.globalspec.com/learnmore/optics_optical_components/fiber_optics/fiber_optic_cable (25.8.2022.)
- [41] <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-29-16-25824&id=453806>
(25.8.2022.)

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na engleskom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
SMF	Single Mode Fiber	Jednomodno vlakno
MMF	Multimode Fiber	Višemodno vlakno
SI	Step Index	Indeks koraka
GI	Gradded Index	Stupnjevani indeks koraka
POF	Plastic Optical Fiber	Plastično optičko vlakno
GOF	Graded Optical Fiber	Gradirano optičko vlakno
SI POF	Single Mode Plastic Optical Fiber	Jednomodno plastično optičko vlakno
GI POF	Graded Index Plastic Optical Fiber	Višemodno plastično optičko vlakno
UTP	Unshielded Twisted Pair	Neoklopljena uvrnuta parica
PMMA	Polymethyl Methacrylate	Akrilno staklo
CYTOP	Cyclized Transparent Optical Polymer	Ciklični prozirni optički polimer
LAN	Local Area Network	Lokalna mreža
LD	Laser Diode	Laserska dioda
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser	Površinski emitirajući laser s okomitom šupljinom
PS	Polistiren	Stiropor
PC	Polycarbonate	Polikarbonat
OTDR	Optical Time Demand Reflectometer	Optički reflektor vremena
ITU	International Telecommunication Union	Međunarodna unija za telekomunikacije
MOST	Media oriented system transfer	Medijski orjentirani prijenos sustava
VAG	Volkswagen – Audi Group	Volkswagen – Audi grupa
BMW	Bayerische Motoren Wagen	Bayerische Motoren Wagen
TCP	Transmission Control Protocol	Protokol kontrole prijenosa
IP	Internet Protocol	Jedinstvena brojčana oznaka
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Europski institut za telekomunikacijske standarde
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Institut inženjera elektrotehnike i elektronike

FTTH	Fiber to the Home	Vlakno do kućanstva
EMV	Electromagnetic compatibility	Elektromagnetska kompatibilnost

POPIS SLIKA

Slika 1. Plastično optičko vlakno	1
Slika 2. Usporedba presjeka optičke niti s plastičnom optičkom niti.....	3
Slika 3. Prikaz smanjenja atenuacije kod plastičnih optičkih niti.....	5
Slika 4. Spektri prigušenja PMMA i GI POF-ova na bazi CYTOP-a.....	10
Slika 5. Eksperimentalno mjerenje bandwidth-a	11
Slika 6. Prikaz profila indeksa loma	13
Slika 7. Prikaz plastične optičke niti.....	15
Slika 8. Spektri slabljenja SI POF-a na bazi PMMA prije i nakon ispitivanja visoke vlažnosti pri 90% i 50°C	17
Slika 9. Prikaz vrsta POF-a	19
Slika 10. Usporedba između standardnog UTP Cat.5e bakrenog kabela i PMMA-SI-POF duplex kabela	20
Slika 11. Prikaz presjeka GI-POF	21
Slika 12. Proces izvlačenja predforme.....	23
Slika 13. Proces skupne ekstruzije.....	24
Slika 14. Proces kontinuirane ekstruzije.....	25
Slika 15. Prikaz atenuacije mjerene cutback tehnikom.....	28
Slika 16. Prikaz mjerenja propusnosti u vremenskoj domeni	30
Slika 17. Slika OTDR-a.....	31
Slika 18. Uređaj za fuzijsko spajanje	32
Slika 19. Optički atenuator.....	33
Slika 20. Slika strukture POF kabela	34
Slika 21. Prikaz POF kabela u presjeku	35
Slika 22. Prikaz indeksa loma	36
Slika 23. Prikaz jednomodne niti	37
Slika 24. Prikaz višemodne niti	38
Slika 25. Prikaz MOST sustava	42
Slika 26. Prikaz digitalne mreže.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1.Usporedba plastične i silicijeve niti.....	4
---	----------

POPIS JEDNADŽBI

Jednadžba 1. Prikaz formule za gubitak prijenosa.....	7
Jednadžba 2. Formula Rayleighovog raspršenja	8
Jednadžba 3. Formula atenuacije	27
<i>Jednadžba 4.</i> Formula za širinu pojasa u vremenskoj domeni.....	29
Jednadžba 5. Formula za širinu pojasa u frekvencijskoj domeni	29