

Analiza značajki svjetlovodnih prijenosnih sustava

Ostrički, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:067684>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-26**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Luka Ostrički

ANALIZA ZNAČAJKI SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2015

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

ANALIZA ZNAČAJKI SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA
ANALYSIS OF FEATURES OF OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS

Mentor: prof. dr. sc. Slavko Šarić

Student: Luka Ostrički, 0135226301

Zagreb, rujan 2015

SADRŽAJ

SAŽETAK	IV
SUMMARY	V
1. UVOD	1
2. OSNOVNI ZAKONI OPTIKE	2
2.1. Maxwellove jednadžbe	2
2.2. Geometrijska optika	5
2.2.1. Zakon o pravocrtnom širenju svjetlosti.....	5
2.2.2. Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova.....	6
2.2.3. Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti.....	6
2.2.4. Zakon loma ili refrakcije svjetlosti	7
2.2.4.1. Fermatovo načelo.....	9
2.3. Fizikalna optika.....	10
2.3.1. Interferencija	10
2.3.2. Ogib svjetlosti	12
2.3.3. Polarizacija svjetlosti	12
2.3.4. Foto-električni učinak (efekt)	13
2.4. Ravno zrcalo	14
2.5. Planparalelna ploča	15
2.6. Optička prizma.....	15
2.7. Totalna refleksija	16
3. VRSTE I KONSTRUKTIVNE ZNAČAJKE SVJETLOVODNIH SUSTAVA.....	18
3.1. Vrste svjetlovoda	19
3.1.1. Višemodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma.....	20

3.1.2. Višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma.....	21
3.1.3. Jednomodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma.....	21
3.2. Osnovne konstruktivne značajke svjetlovoda.....	23
3.2.1. Način prijenosa signala pomoću svjetlovoda.....	26
3.2.1. Svjetlovodni optički moduli.....	27
3.2.2. Svjetlovodni optički kabel	28
3.2.3. Konektori	30
4. KARAKTERISTIKE SVJETLOVODA.....	31
4.1. Prigušenje.....	32
4.2. Disperzija	34
4.2.1. Kromatska disperzija	35
4.2.2. Nekromatska disperzija.....	35
4.2.3. Polarizacijska disperzija.....	35
4.3. Optički odnos signal – šum (OSNR)	36
4.4. Širina propusnog opsega	36
4.5. Nelinearne karakteristike svjetlovoda.....	37
4.6. ITU-T standardi	38
5. MJERENJA NA KOMPONENTAMA SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA.....	40
5.1. Mjerenje na svjetlovodnoj niti	40
5.2. Mjerenje prigušenja svjetlovodne niti.....	41
5.3. Mjerenje disperzije svjetlovodne niti.....	42
5.3.1. Mjerenje disperzije svjetlovoda u vremenskom području	43
5.3.2. Mjerenje disperzije svjetlovoda u frekvencijskom području	43
5.4. Određivanje mjesta prekida ili oštećenja svjetlovodne niti	44
6. ZAKLJUČAK.....	46

POPIS OZNAKA.....	47
POPIS SLIKA.....	48
POPIS TABLICA	49
LITERATURA	50

SAŽETAK

Cilj završnog zadatka je analizirati glavne značajke svjetlovodnih prijenosnih sustava. Prije početka razmatranja navedenih značajki i karakteristika svjetlovoda, opisani su osnovni zakoni optike. Zakoni optike su temelji na kojima se bazira princip rada svjetlovoda. Shodno tome, utvrđivanje osnovnih zakona optike je neizostavan dio, bez kojeg se ne može početi opisivati tematika zadatka. Daljnjim razmatranjem detaljno su opisane glavne vrste, kao i osnovne konstruktivne značajke svjetlovoda. Posebno je skrenuta pozornost na karakteristike koje imaju veliki utjecaj na prijenosna svojstva svjetlovoda. Pojašnjeni su i načini mjerenja na komponentama svjetlovodnih prijenosnih sustava, kao i određivanje mjesta prekida i mjesta oštećenja. Na temelju izložene tematike, iznose se relevantni zaključci o svjetlovodnim prijenosnim sustavima.

Ključne riječi: svjetlovod, optika, značajka, prigušenje, disperzija

SUMMARY

The goal of the final task is to analyze the main features of optical transmission systems. Before the beginning of consideration of the above characteristics and the characteristics of the optical waveguide, are described the basic laws of optics. Laws of optics are foundations on which is based the principle of operation the optical waveguide. Therefore, the determination of the basic laws of optics is an indispensable part, without which are can not begin to describe the subject matter of the task. Further consideration were described in detail the main types, as well as the basic structural features of the optical waveguide. Especially drawn attention to the characteristics that have a mayor impact on the transmission propertis of the optical waveguide. Also there are explained ways of measuring the components of fiber optical transmission systems, as well as the determination of the break and the place of damage. Based on the exposed themes, sums up the relevant conclusion of the optical transmission system.

Key words : optical waveguide, optics, feature, attenuation, disperzion

1. UVOD

Svjetlo vodi su širokopojasni vodovi jer rade s frekvencijama od 10^{14} do 10^{15} Hz. Iz tog razloga im je prijenosni kapacitet veoma velik. Njihova osnovna sirovina je kvarc (silicijev dioksid) kojeg ima u ogromnim količinama u prirodi. To su vodovi koji prenose elektromagnetne valove visoke frekvencije koji predstavljaju vidljivu svjetlost. Sastoje se od prozirne staklene ili plastične niti, kroz koju prolazi svjetlost. Svjetlovodne komunikacijske tehnike započinju nagli razvoj početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća. Zbog svojih izuzetno kvalitetnih prijenosnih karakteristika, vrlo malih dimenzija, otpornosti na vanjske utjecaje okoline i trenda smanjivanja troškova proizvodnje, imaju sve češću primjenu u različitim granama ljudskih djelatnosti. S obzirom na to kako u novija vremena razvojem tehnologije, raste i potreba za prijenosom sve većih količina podataka uz velike brzine prijenosa, zahtijevaju se i poboljšanja u svjetlovodnim prijenosnim sustavima. Veliki nedostatak naglog unaprjeđenja svjetlovodnih prijenosnih sustava je taj što se ne posvećuje dovoljna pažnja sigurnosti. S obzirom na to kako se pomoću svjetlovoda prenosi svjetlost, bitno je razmotriti i osnovne zakone optike. Na osnovnim zakonima optike temelji se princip prijenosa signala pomoću svjetlovoda.

2. OSNOVNI ZAKONI OPTIKE

Optika je područje fizike koje proučava svojstva svjetlosti i njezinog međudjelovanja s materijom. Pojam svjetlosti obuhvaća vidljivo, infracrveno i ultraljubičasto područje. Međutim, slične pojave mogu se proučavati i u drugim područjima elektromagnetskog zračenja. Optika ustvari predstavlja posebno područje elektromagnetizma. Pojave u optici ovise o kvantnoj prirodi svjetlosti, te se iz tog razloga mogu povezati i s kvantnom mehanikom. U samoj praksi većina pojava može se objasniti elektromagnetskom prirodom svjetlosti koja se opisuje Maxwellovim jednadžbama. Klasična optika se dijeli na fizikalnu optiku koja objašnjava prirodu svjetlosti i valna svojstva svjetlosti, te na geometrijsku optiku koja opisuje širenje svjetlosti. Postoji i primijenjena optika koja se bavi konstrukcijom i optimizacijom optičkih elemenata, sustava, i naprava kao što su leće, zrcala, prizme, objektivi, okulari, mikroskopi, teleskopi i ostalo. U poglavljima 2.2 i 2.3 opisane su geometrijska, odnosno fizikalna optika.

2.1. Maxwellove jednadžbe

Maxwellove jednadžbe opisuju ovisnost električnog i magnetskog polja o nabojima i strujama. Osim toga, opisuju i njihovo međudjelovanje do kojeg dolazi kada se polja mijenjaju u vremenu. One predstavljaju temelj klasične elektrodinamike i teorijske elektrotehnike. Maxwell je sve poznate zakone kao što su Amperov zakon, Faradayev zakon indukcije i Gaussov zakon ujediniio u skladu s jednadžbom kontinuiteta. Shodno tome, postoje četiri glavne Maxwellove jednadžbe kao što slijedi :

1. Gaussov zakon za elektricitet,
2. Gaussov zakon za magnetizam,
3. Amperov zakon,
4. Faradayev zakon elektromagnetne indukcije

Gaussov zakon za elektricitet govori kako je tok električnog polja kroz bilo koju zatvorenu površinu S jednak je algebarskom zbroju naboja koji se nalaze unutar te površine. Matematički zapis Gaussovog zakona za elektricitet glasi

$$\oint_S E dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (1)$$

Primjenom Gaussovog teorema iz matematike, te naknadnim sređivanjem dobiva se konačni oblik prve Maxwellove jednačbe, odnosno Gaussovog zakona za elektricitet,

$$\nabla E = \operatorname{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Druga Maxwellova jednačba opisuje kako ne postoje magnetski monopoli, zbog činjenice da su magnetske silnice zatvorene krivulje kao što slijedi iz jednačbe,

$$\oint_S B dS = 0 = \int_V \nabla B dV \quad (3)$$

Iz navedenog slijedi

$$\nabla B = 0 \quad (4)$$

što daje krajnji oblik druge Maxwellove jednačbe koji govori kako je magnetska indukcija duž zatvorene krivulje jednaka nuli, odnosno ne postoji razdvajanje polova magneta.

Faradayev zakon elektromagnetske indukcije predstavlja treću Maxwellovu jednačbu koja govori kako je brzina promjene magnetskog polja kroz petlju jednaka elektromagnetskoj sili induciranoj u petlji. Diferencijalni oblik treće Maxwellove jednačbe glasi

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (5)$$

Vremenski promjenjivo polje magnetske indukcije B stvara oko sebe kružno električno polje.

Četvrta Maxwellova jednađba predstavlja Amperov zakon i glasi

$$c^2 \nabla \times B = \frac{J}{\epsilon_0} + \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

U konačnici sve četiri Maxwellove jednađbe prikazane su u tablici 1 u diferencijalnom i integralnom obliku.

Tablica 1. Diferencijalni i integralni oblici Maxwellovih jednađbi [1]

Diferencijalni oblik	Integralni oblik	
$\nabla E = \text{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\int_S E dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$	Gaussov zakon za električno polje
$\nabla B = 0$	$\int_S B dS = 0$	Gaussov zakon za magnetsko polje
$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt}$	$\int_K E dS = -\frac{d}{dt} \int_S B dS$	Faradayev zakon indukcije
$c^2 \nabla \times B = \frac{J}{\epsilon_0} + \frac{dE}{dt}$	$c^2 \int_K B dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_S J dS + \frac{d}{dt} \int_S E dS$	Amperov zakon

Kao što je i prethodno naglašeno, Maxwellove jednađbe opisuju osnovne zakone optike, te su samim time neizostavne prije analize geometrijske i fizikalne optike.

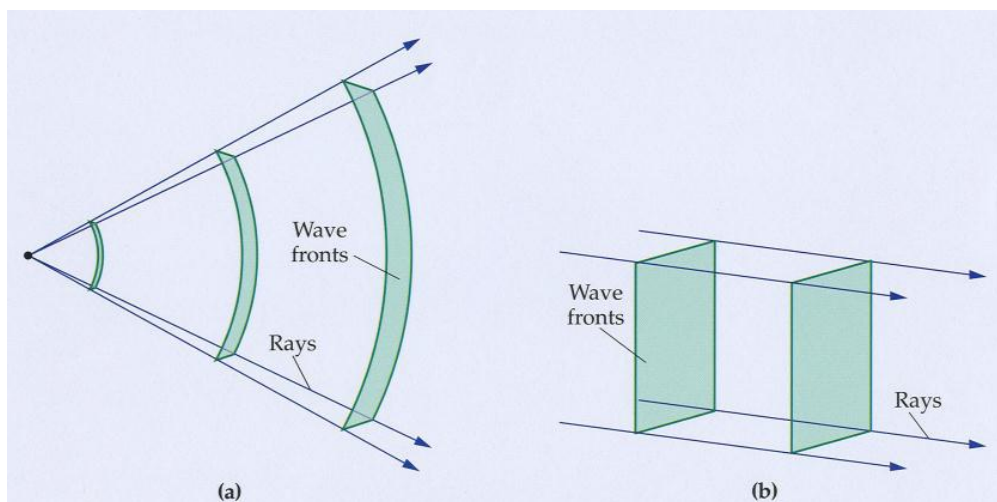
2.2. Geometrijska optika

Geometrijska optika je dio optike u kojoj se za opis svjetlosnih pojava koriste svjetlosne zrake. Postoje četiri osnovna zakona geometrijske optike koji se još nazivaju i zakoni širenja svjetlosti, a to su

1. Zakon o pravocrtnom širenju svjetlosti,
2. Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova,
3. Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti,
4. Zakon loma ili refrakcije svjetlosti

2.2.1. Zakon o pravocrtnom širenju svjetlosti

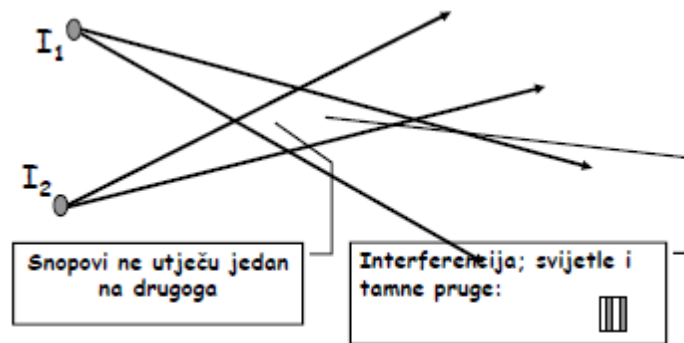
Zakon o pravocrtnom širenju svjetlosti govori kako se u homogenom, optički prozirnem sredstvu svjetlost širi pravocrtno. Zamišlja se da se svjetlost širi u zrakama koje su pravci. Navedeni zakon postaje primjenjiv ako su pojave poput ogiba ili difrakcije zanemarive, odnosno kada je valna duljina svjetlosti puno manja od dimenzija optičke naprave. Na slici 1 prikazan je primjer pravocrtnog širenja svjetlosti.



Slika 1. Prikaz pravocrtnog širenja svjetlosti [3]

2.2.2. Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova

Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova govori da ako jedan snop zraka svjetlosti prolazi kroz drugi, oni ne utječu jedan na drugoga. Ovaj zakon ne vrijedi za koherentne snopove svjetlosti. Slika 2 prikazuje zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova.



Slika 2. Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova¹

2.2.3. Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti

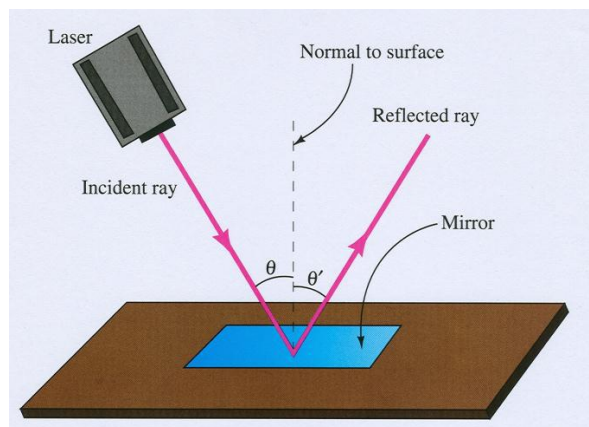
Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti govori kako se svjetlost od glatke reflektirajuće površine odbija tako da je kut upada zrake u odnosu na okomicu reflektirajuće ravnine, jednak kutu refleksije pri čemu vrijede sljedeća dva pravila :

1. Upadna zraka, odbijena zraka i normala leže u istoj ravnini,
2. Kut upada jednak je kutu loma, odnosno $\alpha = \beta$

Slika 3 prikazuje odbijanje upadne zrake od reflektirajuće površine.

¹

https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAAAhUKEwi_3ZiD_fDGAhVIKXIKHeduBss&url=http%3A%2F%2Fphy.grf.unizg.hr%2Fmedia%2Fdownload_gallery%2FOptika_ppoint_bez%2520boje_2.pdf&ei=1riwVb-aG-XSyAPn3ZnYDA&usg=AFQjCNGGyAo75mxhLmfr2TXXO8EQtlRsw&bvm=bv.98476267.d.bGQ&cad=rja
23.7.2015



Slika 3. Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti [3]

2.2.4. Zakon loma ili refrakcije svjetlosti

Zraka svjetlosti koja upada na granicu između dva optička sredstva različitih gustoća lomi se tako da je omjer između sinusa kuta upada i sinusa kuta loma jednak omjeru indeksa lomova tih optičkih sustava. U slučaju ako zraka svjetlosti prelazi iz jednog sredstva u drugo, ona uvijek mijenja smjer. Odbijena zraka leži u istoj ravnini s upadnom zrakom, normalom na granicu u upadnoj točki i lomljenom zrakom. Indeks loma nekog sredstva predstavlja omjer brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u tom sredstvu. Matematički oblik indeksa loma glasi :

$$n = \frac{c}{v} \quad (7)$$

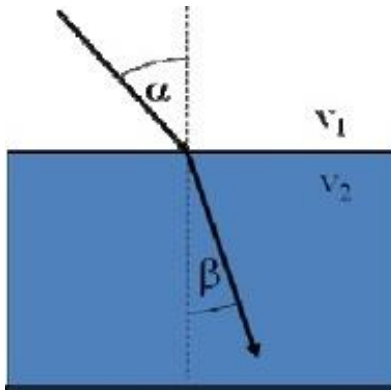
Zakon kojim su povezani upadni kut i kut loma naziva se Snellov zakon i glasi :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (8)$$

U slučaju ako je prvo sredstvo vakuum ili zrak indeks loma poprima sljedeći matematički oblik :

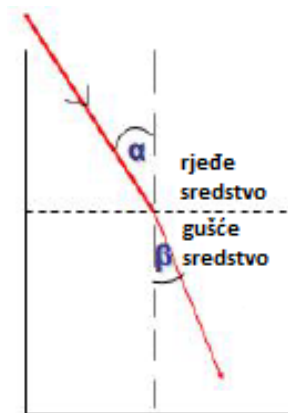
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (9)$$

Lom zrake tijekom prelaska iz jednog sredstva u drugo sredstvo prikazan je na slici 4.



Slika 4. Zakon loma ili refrakcije [4]

Kada zraka svjetlosti prelazi iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo, lomi se prema okomici na graničnu površinu, dok se tijekom prelaska iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, lomi od okomice. Na slikama 5 i 6 prikazana su navedena dva slučaja loma svjetlosti.



Slika 5. Prelazak svjetlosti iz rjeđeg u gušće sredstvo [4]



Slika 6. Prelazak svjetlosti iz gušćeg u rjeđe sredstvo [4]

Indeks loma za vakuum iznosi jedan, za zrak 1,00028, a za vodu 1,333. Udaljenost koju svjetlost prijeđe naziva se geometrijski put, a umnožak indeksa loma i udaljenosti s (udaljenost između dvije točke nekog sredstva) naziva se optički put svjetlosti.

2.2.4.1. Fermatovo načelo

Svjetlost koja se lomi i odbija prevaljuje toliki put između dvije točke da pripadni optički put zrake ima ekstremnu vrijednost, odnosno svjetlost taj put prolazi u najkraćem vremenu. Ova tvrdnja naziva se Fermatovo načelo. Prema Fermatovom načelu mogu se izvesti zakoni odbijanja i zakoni loma prema sljedećem postupku :

$$\text{za } t_1 = t_2; \quad \frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (10)$$

Iz prethodne jednadžbe slijedi kako je $s_1 n_1 = s_2 n_2$, što ujedno predstavlja i optičke puteve svjetlosti.

Uvrštavajući jednadžbu (7) u jednadžbu

$$t = \frac{s}{v} \quad (11)$$

dobiva se izraz

$$t = \frac{sn}{c} \quad (12)$$

Iz jednadžbe (12) vidljivo je kako je vrijeme t minimalno pri brzini svjetlosti c . Shodno tome slijedi da svjetlost, kada se odbija od zrcala uvijek ide najkraćim putem od jedne točke do druge.

2.3. Fizikalna optika

Fizikalna optika pojašnjava prirodu svjetlosti i proučava valna svojstva svjetlosti. U valnoj optici razmatraju se pojave u kojima se svjetlost predočuje kao val. Priroda svjetlosti može biti valna i čestična. Glavne pojave koje se javljaju u valnoj optici su

1. Interferencija,
2. Ogib,
3. Polarizacija

Pojava koja se javlja u čestičnoj prirodi svjetlosti je

1. Foto-električni učinak

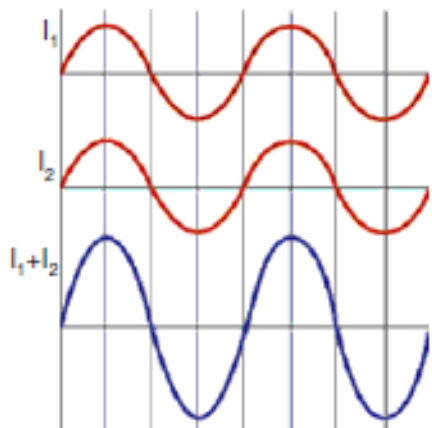
2.3.1. Interferencija

Interferencija je tipična valna pojava koja karakterizira svako valno gibanje. Može se zapaziti na vodi promatrajući valove koji izlaze iz dva izvora. Valovi se u određenim točkama poništavaju, a u drugim pojačavaju. Interferencija može biti konstruktivna i destruktivna. Kod destruktivne interferencije nema titranja, dok je kod konstruktivne interferencije titranje maksimalno. Zato se mjesta konstruktivne interferencije nazivaju interferencijskim maksimumima, a mjesta destruktivne interferencije, interferencijskim minimumima. Kod zvuka bi ovakva pojava značila pojačan ton i nedostatak čujnosti, a kod svjetlosti svijetla i tamna mjesta. Pomak između valova koji interferiraju mora biti nepromjenjiv ako se zahtijeva da se položaji minimuma i maksimuma ne mijenjaju u vremenu.

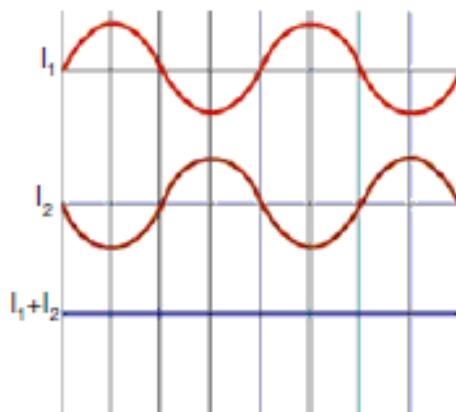
Da bi došlo do interferencije, valovi moraju biti koherentni, odnosno moraju ispuniti sljedeće uvjete

- Identičnost amplituda,
- Identičnost valnih duljina,
- Razlika faza ne smije se mijenjati u vremenu

Na slikama 7 i 8 prikazane su konstruktivna, odnosno destruktivna interferencija.

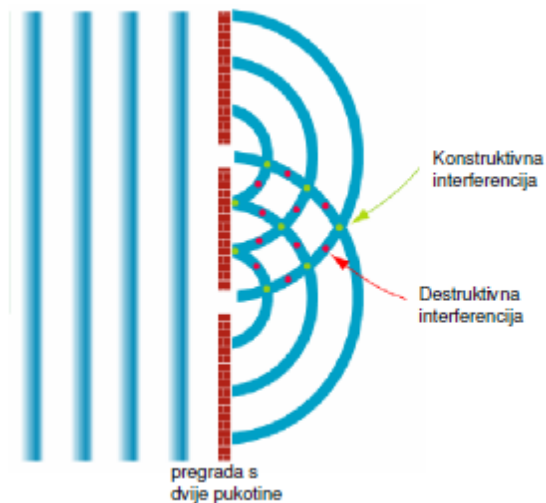


Slika 7. Konstruktivna interferencija [6]



Slika 8. Destruktivna interferencija [6]

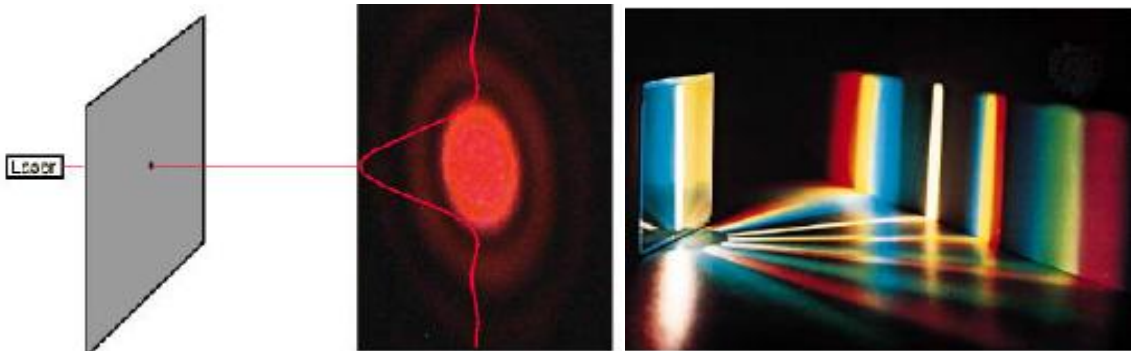
Pokus pri kojem se interferira svjetlost iz dvaju pukotina naziva Youngov pokus. Strujni val se usmjeri prema dvije pukotine koje se nalaze na pregradi. Nakon toga prilikom izlaska iz pukotina nastaju valovi pri čemu dolazi do konstruktivne i destruktivne interferencije kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Youngov pokus [6]

2.3.2. Ogib svjetlosti

U Youngovom pokusu mogu se opaziti svijetle i tamne pruge interferencije kada se osvijetle pukotine. Svijetle i tamne pruge vide se i kada se osvijetli samo jedna pukotina. Pojava pri kojoj dolazi do skretanja valova iza ruba zapreke naziva se ogib svjetlosti ili difrakcija. Opaža se kod svih vrsta valova. Slika 10 prikazuje ogib svjetlosti.

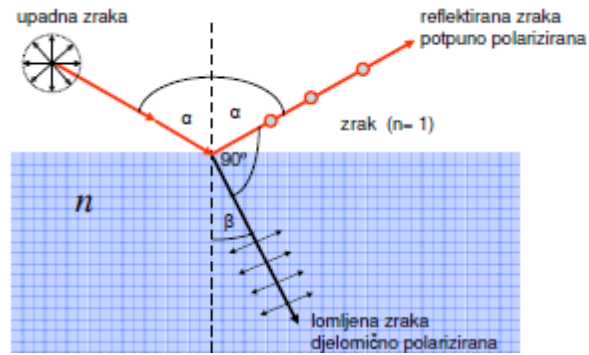


Slika 10. Ogib svjetlosti [6]

Na slici 10 vidljivo je kako svjetlost ima valna svojstva. Kada se pukotina osvijetli bijelom svjetlošću, na zastoru se mogu opaziti spektri bijele svjetlosti i tamne pruge. Ogib svjetlosti je uvjet kako bi interferencija mogla uopće nastati.

2.3.3. Polarizacija svjetlosti

Kaže se daje elektromagnetski val polariziran ako pri njihovom širenju električno polje titra samo u jednoj ravnini. Svjetlost potiče od atoma izvora, a svaki atom emitira val neovisno o drugim atomima, pa je tako dobivena svjetlost nepolarizirana. Svjetlost se prolaskom kroz neke materijale polarizira, a takvi materijali se nazivaju polaroidima. Brewsterov zakon govori da je reflektirana zraka linearno polarizirana ako je kut između reflektirane i lomljene zrake pravi. Polarizacija kod refleksije svjetlosti prikazana je na slici 11.

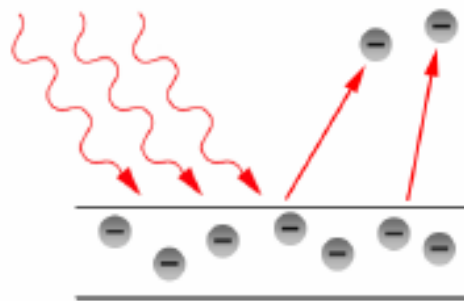


Slika 11. Polarizacija kod refleksije svjetlosti [6]

S obzirom na to da polariziran može biti samo transverzalni val, polarizacija pokazuje da je svjetlost, ne samo val nego i transverzalni val.

2.3.4. Foto-električni učinak (efekt)

Foto-električni efekt je fizikalna pojava kod koje djelovanjem elektromagnetskog zračenja dovoljno male valne duljine, dolazi do izbijanja elektrona iz obasjanog materijala. Ako je valna duljina veća od granične, neće doći do izbijanja elektrona jer elektroni tada ne mogu primiti dovoljno energije za raskidanje veze s atomom. Za foto-električni efekt potrebni su fotoni energije od nekoliko elektronvolti do preko 1 MeV i kemijski elementi visokog atomskog broja. Ovo otkriće dovelo je do važnog otkrića kvantne prirode svjetlosti i elektrona. Slika 12 prikazuje foto-električni efekt.



Slika 12. Foto-električni efekt [6]

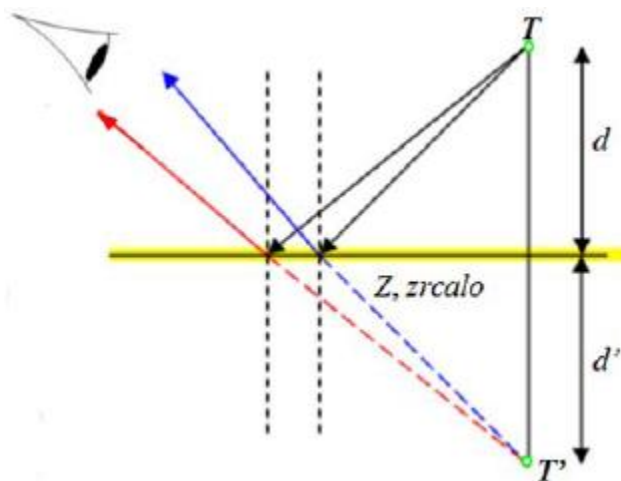
2.4. Ravno zrcalo

Ravno zrcalo je glatka površina koja odbija zrake svjetlosti prema zakonu refleksije. Zrcala imaju koeficijent refleksije približno jedan, $r \approx 1$. Općenito vrijedi :

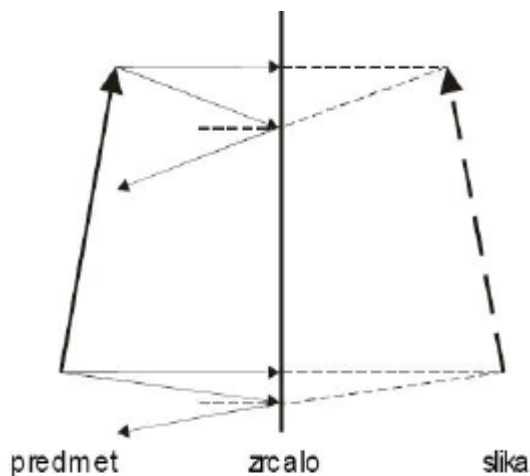
$$a + t + r = 1 \quad (13)$$

Pomoću zrcala može se pronaći slika bilo kojeg predmeta, jer se svaka točka slike može odrediti pomoću dvije zrake koje dolaze od objekta. Realna slika nastaje u presjecištu reflektiranih zraka, a virtualna slika nastaje u presjecištu nastavaka reflektiranih zraka. Slika 13 prikazuje preslikavanje točke (u ovom slučaju točka T) pomoću ravnog zrcala, dok slika 14 pokazuje preslikavanje predmeta. Osobine slike u ravnom zrcalu su :

- Slika je virtualna,
- Jednako udaljena od zrcala kao i predmet,
- Jednako velika kao i predmet,
- Uspravna,
- Zrcalno simetrična



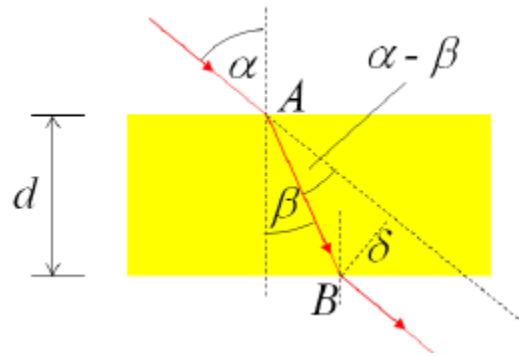
Slika 13. Preslikavanje točke [4]



Slika 14. Preslikavanje predmeta [4]

2.5. Planparalelna ploča

Karakteristika loma zrake svjetlosti na paralelepipedu je ta što su ulazna i izlazna zraka paralelne. Slika 15 prikazuje lom zrake na planparalelnoj ploči.



Slika 15. Lom zrake na planparalelnoj ploči [4]

Primjenom Pitagorinog poučka može se doći do sljedeća dva izraza

$$\delta = AB \sin(\alpha - \beta), \quad (14)$$

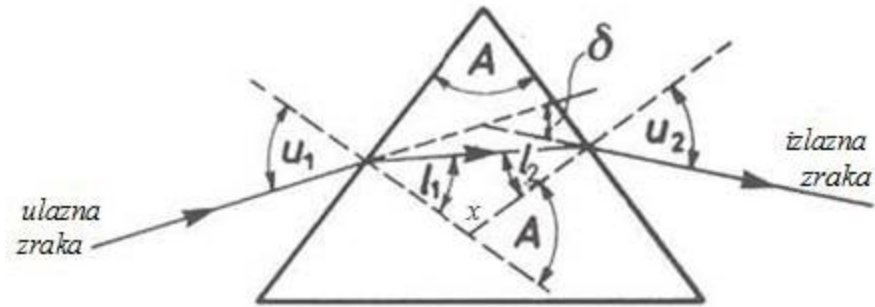
$$AB = \frac{d}{\cos \beta} \quad (15)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (14) u jednadžbu (15) dobiva se sljedeći izraz za pomak izlazne zrake prema ulaznoj,

$$\delta = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \quad (16)$$

2.6. Optička prizma

Optička prizma je prozirno sredstvo omeđeno s dvije ravne dioptrijske plohe koje zatvaraju kut prizme. Uglavnom je izrađena od stakla i kvarca. Glavni presjek optičke prizme je trokut kao što to prikazuje slika 16.



Slika 16. Optička prizma [4]

Kada zraka svjetlosti prolazi simetrično, kut δ je minimalan, odnosno devijacija je minimalna. Shodno tome, izraz za kut najmanje devijacije glasi

$$\delta_{\min} = 2u - A \quad (17)$$

Ako je prizma načinjena od sredstva indeksa loma n , tada vrijedi sljedeći izraz

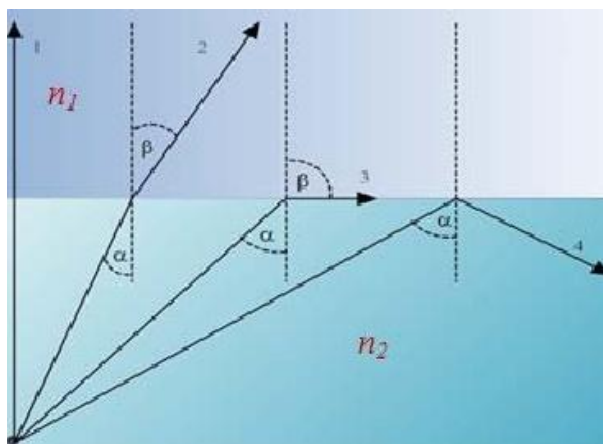
$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{\min} + A}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}} \quad (18)$$

Mjerenjem kuta najmanje devijacije, može se odrediti indeks loma sredstva.

$$\delta_{\min} = n - 1 A \quad (19)$$

2.7. Totalna refleksija

Totalna refleksija je pojava koja nastaje samo kada zraka svjetlosti prelazi iz optički gušćeg sredstva na granicu s optički rjeđim sredstvom pod graničnim kutom totalne refleksije ili kutem većim od njega. U ovom slučaju jedan dio svjetlosti se odbije, a jedan dio se lomi u drugo sredstvo. Povećanjem upadnog kuta, povećava se i kut loma kao što to prikazuje slika 17.



Slika 17. Totalna refleksija [4]

Slika 16 prikazuje četiri slučaja prelaska iz optički gušćeg sredstva u optički rjeđe sredstvo za različite upadne kuteve zraka svjetlosti. Sva četiri slučaja mogu se opisati redom na sljedeći način :

- Kada zraka svjetlosti upada okomito na granicu optički gušćeg i rjeđeg sredstva, ne dolazi do loma zrake. Zraka u potpunosti prelazi iz jednog sredstva u drugo.
- Kada svjetlost prolazi iz gušćeg u rjeđe sredstvo kut loma je veći od upadnog kuta
- Granični upadni kut predstavlja onaj kut kod kojeg će kut loma biti 90° . U tom slučaju lomljena zraka ide točno granicom sredstva.
- Za sve kuteve veće od graničnog kuta, svjetlost se reflektira natrag u isto sredstvo. Ta pojava se naziva totalna refleksija.

3. VRSTE I KONSTRUKTIVNE ZNAČAJKE SVJETLOVODNIH SUSTAVA

Otkrivanjem dualne prirode svjetlosti, omogućen je nastanak prvih lasera krajem šezdesetih godina. Tada su se povećala istraživanja u području optičkih vlakana jer je utvrđeno da se optičkom komunikacijom može prenijeti znatno veća količina podataka u odnosu na radio i telefonsku komunikaciju. U to vrijeme, glavni problem je bio što su prvi laseri bili neefikasni i što lasersko svjetlo nije moglo putovati kroz slobodan prostor zbog raspršenja i potpunog gušenja. Nisu zadovoljavali u smislu disipirane snage, pregrijavanja, kratkog vijeka trajanja i velike potrošnje struje. Sredinom šezdesetih godina dvadesetog stoljeća, optička vlakna su bila jedno od mogućih rješenja problema prijenosa svjetlosti. Eksperimentima je utvrđeno da staklena vlakna debljine vlasi kose najbolje prenose svjetlost na male udaljenosti. Korištena su u medicini i industriji za dovođenje svjetlosti na nedostupna mjesta. Problem je stvaralo to što je svjetlost gubila do 99% svoje snage pri prolasku kroz optičko vlakno. Naknadno je ustanovljeno kako visoki gubici koji karakteriziraju postojeća optička vlakna nastaju zbog malih nečistoća unutar stakla. Optička vlakna tako visokog stupnja prozirnosti nisu se mogla izrađivati uobičajenim metodama, nego kemijskim putem realizacijom čistog silicijevog stakla SiO_2 , u svrhu korištenja u komercijalne svrhe izvan laboratorija. U samim počecima znanstvenici nisu bili zadovoljni jednomodnim svjetlovodima koji su imali jezgru promjera svega nekoliko mikrometara. Karakterizirao ih je još i uski frekventijski pojas te stepeničasti indeks loma. U ulaznom konektoru dolazilo je prilikom dovođenja svjetla u svjetlovod do raspršenja zrake zbog nedovoljne tolerancije. Razvojem višemodnih svjetlovoda kod kojih se zraka rastavljala u više zraka unutar svjetlovoda, reducirali su se prethodno navedeni problemi. Prvi višemodni svjetlo vodi koristili su jezgru promjera $50\ \mu\text{m}$ i $62,5\ \mu\text{m}$, te valnu duljinu svjetlosti od $850\ \text{nm}$. U začetima razvoja tehnologije optičkih vlakana, usko grlo cijelog sustava bila su pojačala za regeneriranje oslabljenih signala. Pojačalo je moralo detektirati svjetlosni snop pretvoriti u električni signal. Pojačavajući električni signal i vodeći na novu lasersku diodu, stvarao bi se novi, pojačani optički signal. Cijeli sustav bio je ograničen kapacitetom elektroničkih pojačala, koji je znatno manji od raspoloživog kapaciteta svjetlovoda.

3.1. Vrste svjetlovoda

Svjetlovodi se mogu podijeliti s obzirom na vrstu materijala za jezgru i plašt, s obzirom na promjenu indeksa loma, te s obzirom na broj modova koji se mogu prenositi i na prozor na valnoj karakteristici prigušenja koji svjetlovod koristi.

Svjetlovod s obzirom na vrstu materijala koju koristi za jezgru i plašt može biti :

- oboje od kvarcnog stakla (SiO_2),
- oboje od višekomponentnog stakla (smjesa SiO_2 s alkalnim, zemnoalkalnim i kovinskim oksidima Na_2O , SiO_2 i ostalo),
- jezgra od kvarcnog stakla, a plašt od plastične mase,
- oboje od plastičnih masa

Prijelaz s većeg indeksa loma jezgre na manji indeks loma plašta može biti :

- sa skokovitom promjenom indeksa loma,
- s kontinuiranom, gradijentnom promjenom indeksa loma

Podjela svjetlovoda s obzirom na broj modova koji se mogu prenositi je na :

- jednomodne (monomodne),
- višemodne (multimodne)

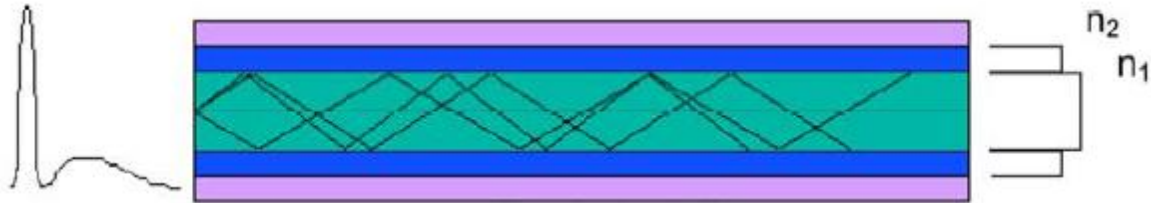
S obzirom na prozor na valnoj karakteristici prigušenja koji koristi svjetlovod dijele se na :

- prvi prozor na 850 nm,
- drugi prozor na 1300 nm,
- treći prozor na 1500 nm,
- četvrti prozor na 1610 nm

Tijekom daljnjeg razmatranja detaljno je opisana podjela svjetlovoda prema broju modova i prema indeksu loma.

3.1.1. Višemodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma

Na slici 18 prikazan je višemodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma.



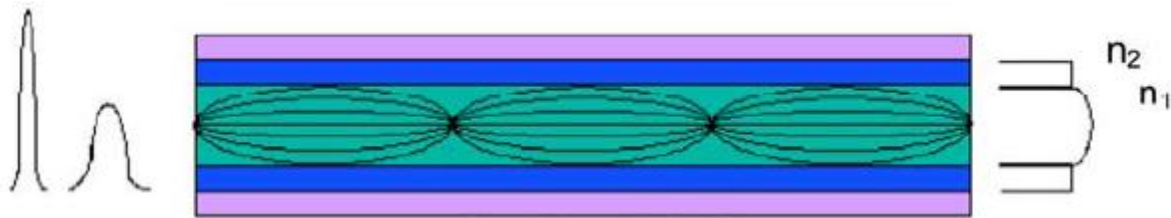
Slika 18. Višemodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma [9]

Ovaj svjetlovod karakterizira promjer jezgre koji je usporediv s promjerom omotača. Promjer jezgre mu je puno veći od valne duljine zrake koju prenosi svjetlovod. Kod ovog svjetlovoda postoji diskontinuitet u prijelazu indeksa loma na granici jezgre i omotača. Uzrok tome je što se zraka na ulasku u svjetlovod rasipa u više zraka. Najniži modovi se kreću uzduž osi optičkog kabela, dok se viši modovi vide kao zrake koje se reflektiraju, prilikom čega porastom moda raste i razmak između točaka u kojima se događa refleksija. Polje na granici je eksponencijalno opadajuće, pa zrake imaju tendenciju prolaska u plašt tijekom refleksije, što za posljedicu ima prigušenje. Izlazni signal je prigušen, pri čemu se disipira toplina i snaga zrake. Odnosno dolazi do kromatskog rasipanja zato što svi modovi ne prolaze isti put tijekom refleksije. Najniži modovi prolaze najkraći put, dok najviši modovi prolaze najduži put. Stoga sve zrake ne stignu u isto vrijeme na kraj svjetlovoda, što dovodi do vremenske disperzije. Kromatska disperzija opisana je u poglavlju 4.2.1.

Ove svjetlovođe karakterizira veće prigušenje i vremenska disperzija. Shodno tome, ovakvi svjetlovođi se koriste za povezivanje do 5 km. Dimenzije jezgre su 50/125 μm ili 62,5/125 μm . Jezgra promjera 50 μm može propagirati 300 modova, dok jezgra promjera 62,5 μm može čak do 1100 modova. Kod svjetlovoda s valnom duljinom 850 nm i dimenzijom 50 μm s optičkim prozorom, može se postići brzina prijenosa do 1 Gbps na udaljenosti 1 km, dok sa 62,5 μm samo 275 m. Karakterizira ih još i niska cijena.

3.1.2. Višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma

Na slici 19 prikazan je višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma.



Slika 19. Višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma [9]

Ovaj tip svjetlovoda izrađuje se većinom od stakla. Karakterizira ga to što ima indeks loma koji se mijenja po paraboli. Viši modovi ovog svjetlovoda su ograničeni, pa je stoga ograničeno i prigušenje. S promjenom gradijenta indeksa loma, mijenjaju se i modovi. I kod ovih svjetlovoda postoji vremenska disperzija, ali s obzirom na to kako su viši modovi ograničeni, tako su i disperzija i prigušenje ograničeni. Izlazni impuls je vremenski razvučen, ali ne kao kod stepeničastog indeksa loma višemodnog svjetlovoda. U odnosu na ostala dva tipa svjetlovoda, ovaj svjetlovod je srednje rangiran s obzirom na cijenu. Promjer jezgre može biti 50, 62,5 i 85 μm uz plašt 125 μm . Najčešće korišten je svjetlovod dimenzija 62,5/125 μm .

3.1.3. Jednomodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma

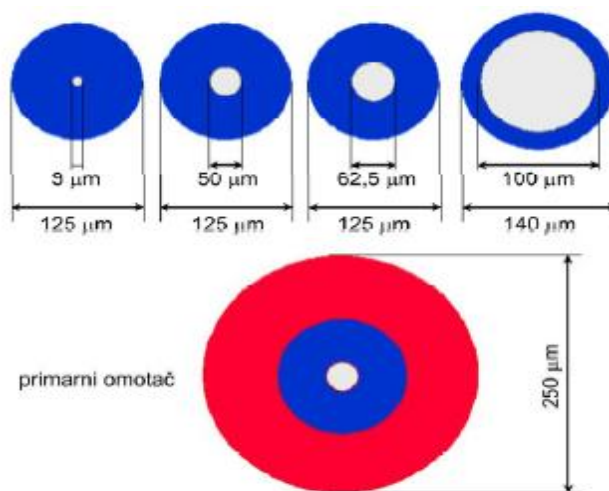
Na slici 20 prikazan je jednomodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma.



Slika 20. Jednomodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma [9]

Karakteristika ovih svjetlovoda je da imaju jezgru puno manjeg promjera nego što je omotač. Valna duljina zrake je usporediva s promjerom jezgre. Kod ovih svjetlovoda ne dolazi do razdvajanja zraka zbog malih promjera jezgre. Svjetlost se dovodi s jednog kraja na drugi putem jedne zrake koja se giba po centralnoj osi kao što to pokazuje slika 20. Ovaj svjetlovod radi u najnižem modu, zbog čega se i naziva jednomodni svjetlovod. Ova vrsta svjetlovoda nema gubitaka zbog zagrijavanja i nema raspršivanja u vremenu zbog različitog prolaska puta zrake. Ove svjetlovođe karakterizira kritična valna duljina. To je najmanja valna duljina koja se generira tijekom propagacije u osnovnom modu. Na kritičnoj valnoj duljini javlja se drugi mod koji uzrokuje gubitke. Kada se valna duljina povećava u odnosu na kritičnu, počinju se javljati gubici osnovnog moda, te se sve više energije prenosi kroz plašt. Unatoč tome, javlja se malo prigušenje izlaznog impulsa i vremensko rasipanje.

Ovi svjetlovođi imaju jezgru promjera od 8 do 10 μm i promjer plašta 125 μm . Izrađuju se od silicijskog stakla jer se plastika ne koristi zbog malog promjera jezgre. Tijekom izrade koristi se vanjska depozicija naparavanja. Jednomodni svjetlovođi su skupi i koriste se tamo gdje je potrebna velika brzina i kapacitet prijenosa podataka. Jednomodni svjetlovod može biti s gradijentnim ili dvostrukim indeksom loma. Jednomodni svjetlovođi imaju do 50 puta veću brzinu prijenosa podataka u odnosu na višemodne svjetlovođe, bez obzira na indeks loma. U današnjoj praksi jednomodni svjetlovođi se smatraju kvalitetnijim. Na slici 21 prikazane su dimenzije svjetlovodnih niti.



Slika 21. Dimenzije svjetlovodnih niti [9]

3.2. Osnovne konstruktivne značajke svjetlovoda

Osnovni dijelovi svakog svjetlovoda su jezgra, odrazni plašt, primarna zaštita i sekundarna zaštita. Jezgra predstavlja dio svjetlovoda koji služi za prijenos svjetlosnog signala. Kao što je prethodno rečeno, jezgra može biti izrađena od više materijala kao što su kvarcno staklo, višekomponentno staklo ili plastična masa. Promjer jezgre iznosi od nekoliko milimetara (monomodna) do nekoliko stotina milimetara (višemodna). Odrazni plašt koristi se za odbijanje svjetlosnog signala. Svjetlosni signal se tako odbija natrag u jezgru. Indeks loma jezgre veći je od indeksa loma odraznog plašta za 0,5 do 2 %. Primarna zaštita služi za mehaničku zaštitu jezgre i odraznog plašta, te se sastoji od tankog sloja neke plastične mase, koja se nanosi na vlakno (jezgru ili plašt) ekstruzijom, neposredno nakon izvlačenja. Sekundarna zaštita koristi se za dodatnu mehaničku zaštitu optičkog vlakna te za zaštitu od vlage i raznih kemikalija. Sastoji se od vrlo debelog sloja neke plastične mase, koji se nanosi na vlakno s primarnom zaštitom, s punjenjem posebnom masom ili bez punjenja. Tijekom izrade, jezgra i plašt se izrađuju kao jedno tijelo s tim da postoje razlike u sastavu i indeksu loma. Prilikom postavljanja trećeg sloja treba paziti da nije optički vodljiv. Zaštitni omotač se izrađuje od visokoperforirane plastike, višeslojnih polimera i tvrdih neporoznih elastomera. Promjer vanjskog zaštitnog plašta je oko 250 μm i 900 μm . Zaštitni omotač predstavlja primarnu zaštitu.

Na slici 22 prikazan je silicijev dioksid SiO_2 .

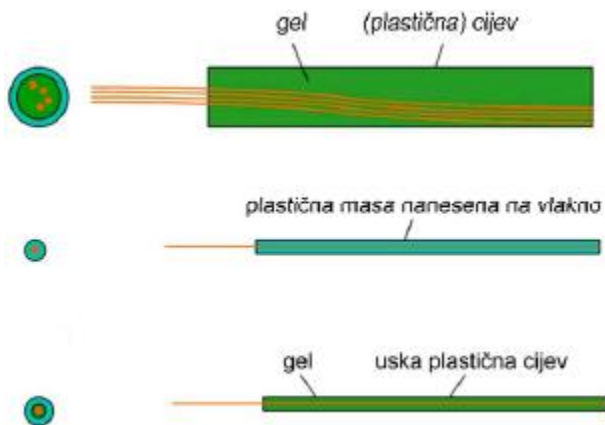


Slika 22. Silicijev dioksid- kvarc [8]

Postoje tri glavne vrste zaštitnih omotača koji se danas koriste, a to su labavi, čvrsti i polučvrsti zaštitni omotač. Neke od značajki navedenih zaštitnih omotača su kao što slijedi :

- Labavi zaštitni omotač koristi plastičnu cjevčicu čiji je unutarnji promjer nekoliko puta veći od vanjskog promjera. U jednoj cjevčici nalazi se jedna ili više niti, dok je cjevčica ispunjena gelom ili uljem. Navedena cjevčica izolira niti od ostatka kabela, te ih štiti od vanjskih sila koje djeluju na kabel.
- Čvrsti zaštitni omotač je plastična zaštita koja se nanosi izravno na niti. Tako se povećava udarna otpornost kabela, ali ovakav tip zaštite je osjetljiv na promjene temperature. Uslijed temperaturne promjene dolazi do mehaničkog opterećenja niti, što za posljedicu ima pojavu pregiba u niti.
- Polučvrsti zaštitni omotač povezuje dobra svojstva prethodne dvije vrste omotača.

Vanjski omotač štiti od mehaničkih i kemijskih oštećenja uzrokovanih uljem, kiselinama, alkalima, glodavcima i tako dalje. Na slici 23 prikazane su prethodno spomenute vrste zaštitnih omotača.



Slika 23. Vrste zaštitnih omotača [9]

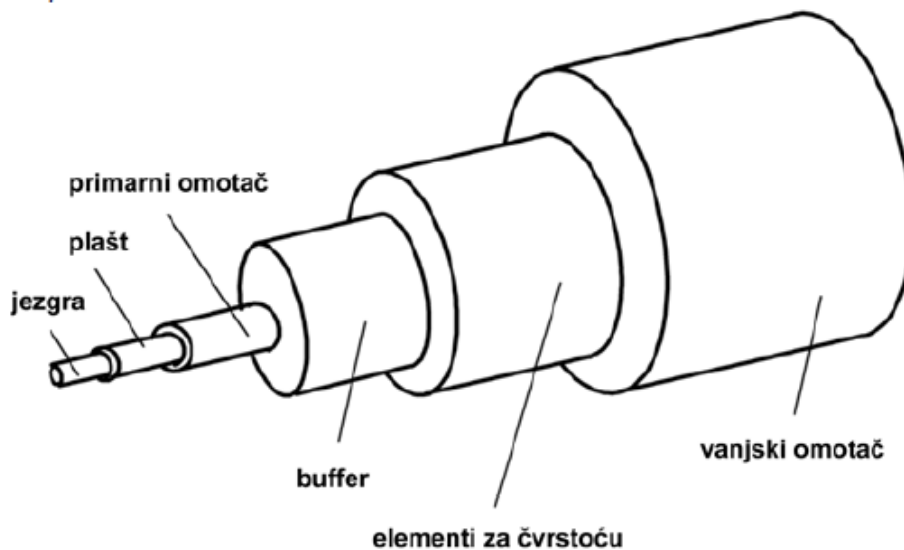
Najrašireniji su svjetlovodi s jezgrom od stakla. Ponekad se još dodaju bor i fluor kako bi se smanjio stupanj lomljenja zrake. Primjenjuju se još germanij, titan i fosfor u svrhu povećanja

stupnja refrakcije. Njihovim dodavanjem povećava se prigušenje, apsorpcija i raspršenje, te ovakvi svjetlovodi imaju i višu cijenu.

Svjetlovodi izrađeni od plastičnih masa imaju puno veće prigušenje i dosta su većih dimenzija. Koriste se u industrijskim postrojenjima jer su jeftiniji. Jako su zapaljivi pa se postavljaju u temperaturno izolirane cijevi. Najčešće korištene dimenzije su 480/500 μm , 735/750 μm i 980/1000 μm . Jezgra se sastoji od materijala PMMA (poli-metil-meta-akril), dok je plašt izrađen od fluoropolimera.

Često korišten materijal je PSC (smjesa plastike i silicija). Jezgra mu je od stakla, a plašt od polimera. Kada je plašt izrađen od polimera javljaju se problemi oko spajanja na konektore, zato što nije moguće zavarivanje na klasičan način kao što je to slučaj kod staklenih svjetlovoda.

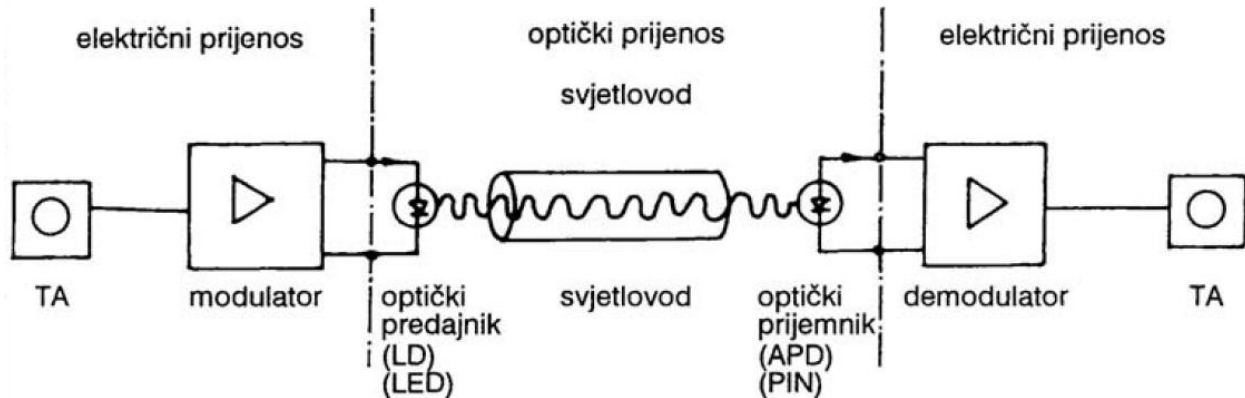
Na slici 24 prikazana je svjetlovodna nit i njeni prethodno opisani glavni dijelovi.



Slika 24. Glavni dijelovi svjetlovoda [9]

3.2.1. Način prijenosa signala pomoću svjetlovoda

Za prijenos signala potrebna su tri dijela, a to su dva dijela u kojima se odvija električni prijenos i jedan dio u kojem se odvija optički prijenos. Jedan takav sustav prikazan je na slici 25.



Slika 25. Sustav prijenosa signala pomoću svjetlovoda [7]

Optički predajnik, odnosno elektrooptički pretvarač koristi jaki izvor svjetlosnog signala, koji se može modulirati u ritmu promjena električnog signala. Najčešće korišteni optički predajnici su LD (laser dioda) i LED (dioda koja emitira svjetlost) diode. LD je jači, manje pouzdaniji i skuplji izvor svjetlosti, dok je LED slabiji, više pouzdan i jeftiniji izvor svjetlosti. Optički prijamnik (optoelektrički pretvarač) ima osjetljiv detektor svjetlosti, u kojemu se obavlja konverzija svjetlosnog signala u električni. Optički prijamnici koji se danas koriste su PIN fotodioda i APD fotodioda (*avalanche photo diode*, lavinska). Širina propusnog opsega je kod PIN fotodioda manja, a kod APD fotodioda je veća. Svjetlovod koji se nalazi između optičkog prijamnika i predajnika, mora biti što manje proziran kako bi gubici bili što manji tijekom prijenosa svjetlosnog signala.

Kod digitalne modulacije impulsi svjetlosti su promjenjive duljine, slijeda i položaja, a kod analogne modulacije obavlja se promjena intenziteta svjetlosti.

Dobre značajke ovakvih vodova su :

- veliki propusni frekventni opseg i niska cijena materijala,
- nije vodljiv i neosjetljiv je na elektromagnetske utjecaje,

- malo prigušenje i male dimenzije i težine,
- velika savitljivost i otpornost na visoke temperature,
- otporan na utjecaj agresivne sredine i nije zapaljiv

Loše značajke ovih vodova su :

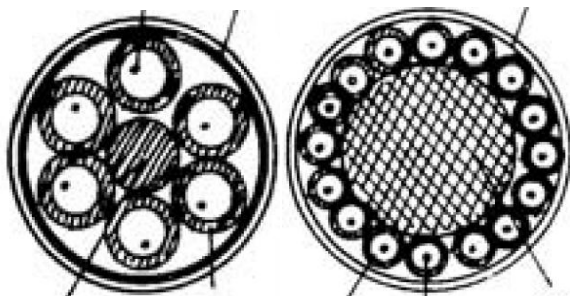
- mala mehanička čvrstoća (osjetljivost na udar),
- osjetljivost na ionizantna zračenja (gubitak svojstva prijenosa je nakon ozračivanja najveći, ali se nakon nekog vremena navedeno svojstvo vrati),
- složeno sastavljanje

3.2.1. Svjetlovodni optički moduli

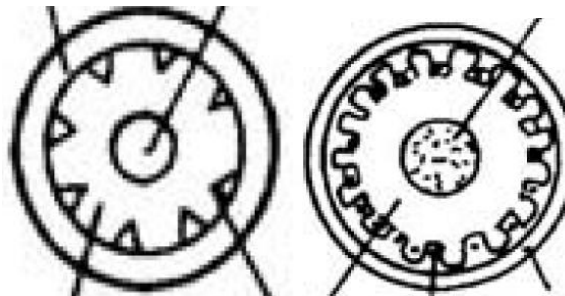
Svjetlovodni optički modul je skup optičkih vlakana, koja su zajedno složena u jednu cjelinu. U današnje vrijeme koriste se tri osnovna tipa modula :

1. Klasični optički modul – vlakna su složena u skupinu koncentričnim použenjem,
2. Žljebasti optički modul – vlakna su uložena u žljebove, odnosno utore na cilindričnom nosivom elementu od plastične mase. Ovaj modul s obzirom na svoj modul može biti pravokutan, trokutast i polukružan. Unutar osi nosivog elementa postavlja se i element za mehaničko rasterećenje (primjerice čelična žica),
3. Trakasti optički modul – pojedinačna zaštićena ili nezaštićena vlakna su uložena u posebne vrpce od plastificiranog aluminijskog ili poliestera.

Na slikama 26 i 27 prikazani su klasični optički modul, odnosno žljebasti optički modul.



Slika 26. Klasični optički modul [7]



Slika 27. Žljebasti optički modul [7]

3.2.2. Svjetlovodni optički kabel

Svjetlovodni optički kabel predstavlja skup više optičkih modula koji su na određeni način složeni zajedno. Kao što je prethodno spomenuto, klasični i žljebasti moduli slažu se koncentričnim použenjem, dok se trakasti moduli slažu u redove tako da se dva krajnja modula ostave prazna. Te praznine ostavljaju se u svrhu postavljanja zaštite, koja štiti optička vlakna od rastegnuća, odnosno u kritičnom slučaju od prekida. U tu svrhu najčešće se koriste :

- kovinske žice od aluminija, čelika ili bakra,
- pojedinačna vlakna od poliestera, stakla ili ugljika,
- više upredenih ili upletenih vlakana od plastičnih masa (poliamid – najlon, dralon, polietilen tereftalat – terilen, poliaramid – kevlar i ostalo).

U jezgri kabela, elementi za pojačanje mogu biti raspoređeni na sljedeće načine :

- u središtu jezgre (postiže se najveća fleksibilnost),
- više pojedinačnih vlakana na jezgri,
- oplet preko jezgre (štiti od radijalnih sila).

Ostali elementi u jezgri kabela mogu biti :

- izolirani provodnici od bakra ili aluminija,
- raznovrsne ispune, najčešće od plastičnih masa.

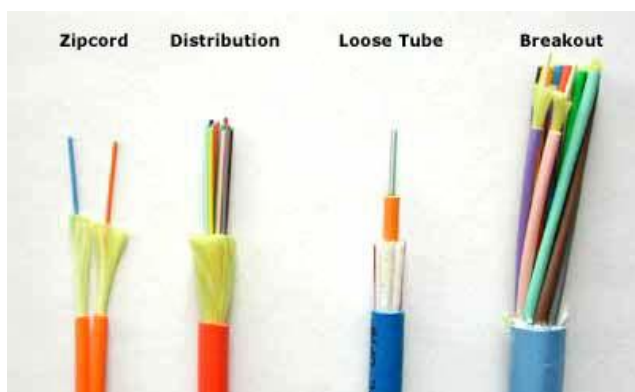
Vrsta zaštite jezgre optičkog kabela odabire se ovisno o njegovoj namjeni, odnosno o načinu polaganja, koje može biti :

- instalacijski (unutar zgrada),
- zračni (iznad zemlje),
- uvlačni (kabelska kanalizacija),
- podzemni (ispod zemlje),
- podvodni (ispod vode).

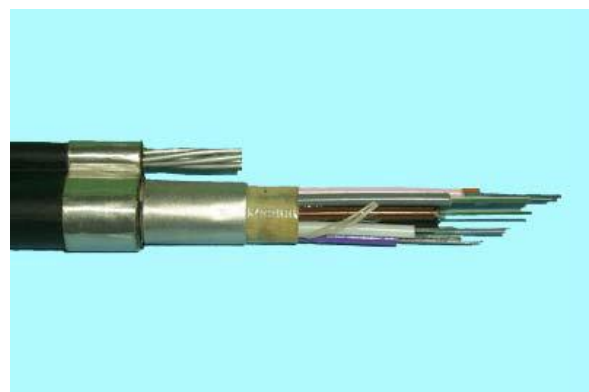
Zaštita jezgre može biti :

- punjenjem jezgre masom,
- amortizirajući sloj između jezgre i plašta, koji služi za smanjenje kontaktnog pritiska između jezgre kabela i plašta. Izrađuje se od plastičnih masa kao što je PVC (poli vinil klorid), poliuretan i tako dalje.

Plašt se izrađuje od polietilena, poliuretana, PVC-a i ostalog. Na slici 28 prikazana su optička vlakna s obzirom na raspored modula unutar kabela, dok je na slici 29. prikazan svjetlovodni kabel sa žljebastim pakiranjem i čeličnim užetom.



Slika 28. Optička vlakna s obzirom na raspored modula unutar kabela [8]



Slika 29. Svjetlovodni kabel sa žljebastim pakiranjem i čeličnim užetom [8]

3.2.3. Konektori

Konektor je najkritičnije mjesto na svjetlovodu jer osim što mora osigurati jednostavnost upotrebe, predstavlja i mjesto gušenja signala. Postoje sljedeće vrste konektora :

- FC konektor upotrebljava se za monomodne i višemodne svjetlovođe, te osigurava visoku preciznost prilikom spajanja na predajnik i prijamnik. Postavljaju se u metalno kućište koje može biti niklovano. Unutar kućišta postavlja se keramički plašt. Njegovo gušenje iznosi oko 0,25 dB.
- SC konektor se isto koristi za oba tipa svjetlovoda. Karakterizira ih jednostavnost, niska cijena i dug vijek trajanja. Ima oko 1000 prekapčanja i gušenje od oko 0,25 dB.
- ST konektor se kao i SC i FC koriste za oba tipa svjetlovoda. Imaju keramički plašt unutar kućišta i broj prekapčanja im je oko 500. Kod monomodnih svjetlovoda gušenje iznosi oko 0,4 dB, a za višemodne svjetlovođe iznosu oko 0,5 dB.
- LC konektor se izrađuje u plastičnom kućištu i koristi se za oba tipa svjetlovoda. Upotrebljavaju se u sustavima koji imaju veliki broj priključaka. Gušenje iznosi oko 0,15 dB za jednomodne svjetlovođe i 0,1 dB za višemodne svjetlovođe.

4. KARAKTERISTIKE SVJETLOVODA

U odnosu na sustave bazirane na bakrenom vodiču, svjetlovodi imaju mnoge prednosti. Zbog izuzetno malog presjeka jezgre javlja se stanoviti kapacitet svjetlovoda. Karakteristike svjetlovoda mogu biti linearne i nelinearne.

U linearne karakteristike spadaju :

- prigušenje (atenuacija),
- kromatska disperzija (CD),
- polarizacijski mod disperzije (PMD),
- optički odnos signal – šum.

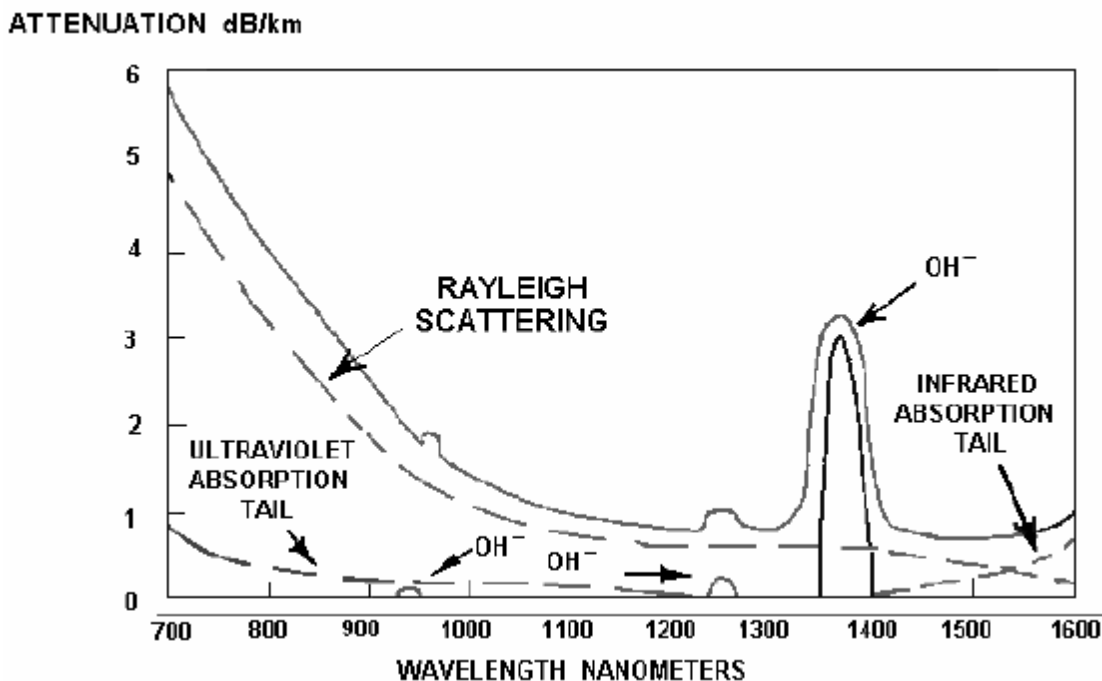
U nelinearne karakteristike spadaju:

- vlastita modulacija faze (SPM),
- križna modulacija faze (XPM),
- miješanje 4 vala (FWM),
- Ramanovo raspršenje (SRS),
- Brillouinovo raspršenje (SBS),
- Kerrov efekt

Najvažnija karakteristika svjetlovoda prilikom projektiranja je prigušenje, dok ostale karakteristike nemaju veliki utjecaj na prijenosna svojstva svjetlovoda. Tijekom daljnjeg razmatranja detaljno su opisane linearne i nelinearne karakteristike svjetlovoda, izuzev interferencije koja je opisana u poglavlju 2.3.1.

4.1. Prigušenje

Prigušenje u svjetlovodima nastaje zbog gubitaka koji su posljedica vanjskih i unutarnjih uzroka. Unutrašnji uzrok je postojanje inherentnih nečistoća koje uzrokuju apsorpciju svjetlosti u materijalu zbog interakcije fotona s molekularnim nečistoćama u staklu, premještanju elektrona, te prijelazu elektrona između energetske razine. Foton se u slučaju udara u nečistoću raspršuje i apsorbira. Pod vanjske utjecaje spada savijanje svjetlovoda prilikom čega dolazi do mijenjanja puta koji zrake prolaze. Ova pojava je pogotovo česta kod višemodnog svjetlovoda. Na slici 30 je prikazano prigušenje u ovisnosti o valnoj dužini.



Slika 30. Prigušenje u ovisnosti o valnoj dužini [8]

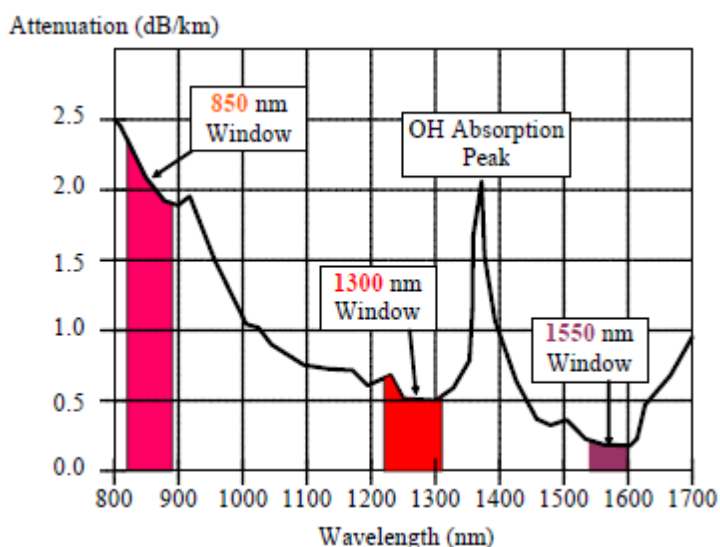
Na slici 30 prikazani su svi faktori koji se zbrajaju i određuju ukupni faktor prigušenja. Rayleighovo raspršenje je naziv za ono gušenje kojem je uzrok raspršenje svjetlosti na nehomogenostima i nečistoćama u materijalu. Emitirana svjetlost naziva se Tyndallova svjetlost. Rayleighovo raspršenje čini čak 96% ukupnog faktora prigušenja i najviše je izraženo od 700 nm do 1000 nm s tim da povećanjem valne duljine znatno opada. S druge strane, pri većim valnim duljinama povećana je infracrvena apsorpcija, dok ispod 800 nm počinje rasti utjecaj

ultraljubičastog zračenja. Najveći ekstrem koji je vidljiv na slici 30 posljedica je postojanja hidroksilnih molekula OH^- . Hidroksilne molekule nastaju kao posljedica vlage. Nemoguće je potpuno suzbiti hidroksilne molekule proizvodnim procesom, a uzrokuju jako rezonantno gušenje. Na spojevima i konektorima najčešće je moguća koncentracija vlage, te kod upotrebe svjetlovoda treba paziti da vlaga ne dođe u doticaj s vlaknom. Vidljivo je gledajući sliku 30, kako valovi veće valne duljine imaju manje gušenje od kratkih valova. Prema dijagramu na slici 30 konstruirana su tri optička prozora koja se koriste u svjetlovodima, a to su :

- I. prozor (850 nm)
- II. prozor (1300 nm)
- III. prozor (1550 nm)

U današnje vrijeme koristi se i četvrti prozor valne duljine 1610 nm. U četvrtom prozoru je prigušenje najmanje, ali taj prozor nije vidljiv na slici 31.

Na slici 31 prikazani su optički prozori.



Slika 31. Optički prozori [8]

Prvi prozor ima minimum prigušenja od oko 2 dB/km, dok drugi i treći prozor imaju minimum prigušenja od oko 0,5 dB/km, odnosno 0,2 dB/km. U današnje vrijeme su proizvedena vlakna s prigušenjem koje se bliži teoretskom. Shodno tome, danas se pojavljuju nova optička vlakna koja mogu imati i više od tri prozora. U početku se najviše koristio prvi prozor, iako to nije bilo optimalno rješenje. Koristio se najviše zbog jeftine realizacije izvora svjetlosti iako je na prvom prozoru najveće gušenje. U današnje vrijeme najčešće su u upotrebi drugi i treći prozor.

Raspršenje svjetlosti zbog nepravilnosti u geometriji i raspršenje svjetlosti na zakrivljenjima imaju utjecaj na gušenje svjetlosti u svjetlovodu. Raspršenje na zakrivljenjima je većinom zanemarivo ali pri malim polumjerima zakrivljenja naglo raste. Do raspršenja svjetlosti dolazi i na spojevima pri nastavljanju svjetlovoda, odnosno njihovog priključka na izvor ili detektor svjetlosti. Izravni utjecaj u tom slučaju imaju razlike u numeričkim otvorima, promjerima vlakana, udaljenosti vlakana te bočnom i kutnom pomaku osi.

Vrsta materijala utječe na prigušenje svjetlovoda. Kvarcno staklo ima najmanje prigušenje (0,5-2 dB/km), dok najveće prigušenje imaju plastične mase. Silikatno staklo ima nešto veće prigušenje od kvarcnog stakla (5-10 dB/km). Prigušenje svjetlovoda ovisi o vrsti vlakana. Monomodna vlakna imaju najmanje prigušenje (0,3-1 dB/km), a višemodna vlakna s gradijentnom promjenom indeksa loma imaju nešto veće prigušenje (1-5 dB/km). Najlošija svojstva imaju višemodna vlakna sa skokovitom promjenom indeksa loma (5-10 dB/km). Prigušenje ovisi i o valnoj dužini svjetlosti koja se koristi za prijenos.

4.2. Disperzija

Pojam disperzije predstavlja pojavu da se svjetlosni impulsi prilikom prijenosa po svjetlovodu proširuju, te tako ograničavaju širinu propusnog opsega. Postoje dvije vrste disperzija, kromatska i nekromatska disperzija. Kromatska disperzija ne ovisi o valnoj duljini, a može biti materijalna i valovodna, dok nekromatska ovisi o valnoj duljini, te može biti međumodna i polarizacijska.

4.2.1. Kromatska disperzija

U kromatsku disperziju spada disperzija materijala koja nastaje zato što indeks loma materijala ovisi o valnoj dužini, zbog čega pojedini elementarni pojasevi spektra stižu na kraj linije s različitim vremenskim zakašnjenjem. Posljedica disperzije materijala je proširenje impulsa. Veličina disperzije za pojedine vrste svjetlovoda je :

- za svjetlovođe sa skokovitim promjenom indeksa loma (višemodne i monomodne), 2-5 ns/km,
- za svjetlovođe s kontinuiranom promjenom indeksa loma (višemodni gradijentni), 0,1.-2 ns/km.

4.2.2. Nekromatska disperzija

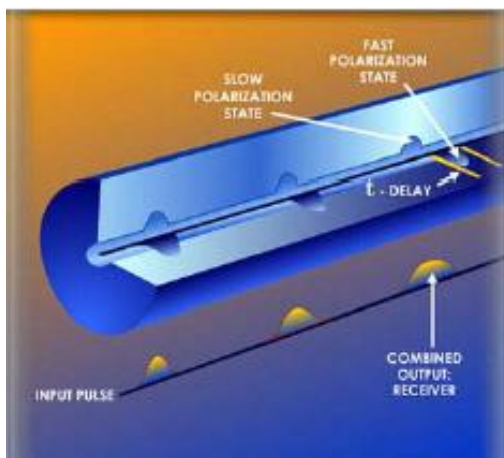
Nekromatska disperzija je višemodna ili intermodna disperzija koja nastaje zato što različiti modovi imaju različite grupne brzine. Posljedica toga je vremensko zakašnjenje kao i kod disperzije materijala, što ima za posljedicu proširenje impulsa. Veličina disperzije za pojedine vrste svjetlovoda je :

- za višemodne svjetlovođe sa skokovitim promjenom indeksa loma, < 20 ns/km,
- za višemodne svjetlovođe s kontinuiranom promjenom indeksa loma (gradijentne), < 50 ps/km,
- za monomodne svjetlovođe sa skokovitim promjenom indeksa loma, 0 ps/km (međusobna kompenzacija).

4.2.3. Polarizacijska disperzija

Polarizacijska disperzija je nekromatska disperzija koja nastaje zbog toga što jezgra svjetlovoda nije idealnog valjkastog oblika, nego je eliptičnog oblika. Kod jednodnodnih svjetlovoda je to karakteristično jer se zraka širi središtem vlakna s dva ortogonalna polarizacijska moda x i y. Dolazi do promjene indeksa loma za ta dva stanja polarizacije, što uzrokuje pomak u vremenu te

dvije osi, odnosno javlja se diferencijalna grupna brzina (DGV) koja uzrokuje proširenje impulsa. Diferencijalna grupna brzina izražava se u ps. Zbog polarizacijske disperzije obično se uzima za rezervu 0,5 dB snage više od planirane. Na slici 32 prikazana je polarizacijska disperzija.



Slika 32. Polarizacijska disperzija [8]

4.3. Optički odnos signal – šum (OSNR)

Optički odnos signala i šuma je bitan jer o njemu ovisi kvaliteta prijenosa signala. Izražava se u decibelima, a vezan je uz BER (Bit Error Ratio) i Q (faktor dobrote). Faktor dobrote definira minimalni optički odnos signala i šuma kako bi se ostvario potreban BER za dani signal.

4.4. Širina propusnog opsega

Širina propusnog opsega definirana je područjem frekvencija, i to onim u kojem se amplituda impulsa ne smanji više od polovine. To obuhvaća sniženje razine optičke snage signala za 3 dB ili smanjenju razine električnog signala na izlazu detektora za 6 dB. Širina propusnog opsega za pojedine vrste svjetlovoda iznosi :

- višemodni, sa skokovitom promjenom indeksa loma, desetine MHz km,

- višemodni, s kontinuiranom promjenom indeksa loma, stotine MHz km,
- monomodni, sa skokovitom promjenom indeksa loma, tisuće MHz km.

Ako se koristi svjetlovod s 200 MHz km, na jednom kilometru dopušteno korištenje signala iznosi 200 MHz. Shodno tome, na 500 metara dopušteno korištenje signala iznosi 400 MHz, dok na dva kilometra iznosi 100 MHz. Odnosno produkt definira moguće duljine kvalitetnog prijenosa po svjetlovodu.

4.5. Nelinearne karakteristike svjetlovoda

Nelinearno širenje impulsa događa se uslijed promjene faze uslijed puta signala svjetlovodom kod vlastite modulacije faze. Navedeni efekt raste s porastom snage signala. Prethodno navedena križna modulacija je posljedica koja se javlja u sustavima s više valnih duljina u jednom svjetlovodu. Valne duljine zasebno ne uzrokuju modulaciju faza jer im je snaga jako mala, ali ako se one pribroje jedna drugoj onda modulacija faza postane značajna. Efekt miješanja četiri vala za posljedicu ima generiranje novih nosioca. Ova karakteristika je nelinearna pa ne vrijedi princip superpozicije. Ovo je karakteristično kod WDM (multipleksiranje valne duljine) sustava, odnosno sustava s više valnih duljina u svjetlovodu. Do ovog efekta dolazi zbog smanjenja razmaka između pojedinih kanala i podizanjem snage. Ramannovo raspršenje je neelastično raspršenje kod kojeg se dio optičke energije pretvara u druge oblike energije. Linearna raspršenja su puno veća od nelinearnih raspršenja. Tijekom Ramannovog raspršenja dolazi do povećanja amplitude zraka manjih valnih duljina, dok se veće valne duljine smanjuju. Još jedno raspršenje koje se može pojaviti, naziva se Brillouinovo raspršenje, te predstavlja pojavu akustičke interakcije fotona i medija. Električno polje uzrokuje pomicanje molekula, mijenjanje indeksa loma i generiranje akustičnog vala. Nakon toga dolazi do raspršenja na periodičkoj rešetki. Kerrov efekt ima za posljedicu izobličenje atoma i molekula pod utjecajem električnog polja.

4.6. ITU-T standardi

Internacionalna telekomunikacijska udruga (ITU) je globalno standardizacijsko tijelo za telekomunikacijske sustave i opremu, koja je izdala norme kojih se moraju pridržavati korisnici i proizvođači svjetlovodnih sustava. Postoji pet normi koje su podijeljene prema vrsti vlakana kao što slijedi :

1. Norma ITU-T G.651 definira višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma promjera jezgre $50\ \mu\text{m}$ i plašta $125\ \mu\text{m}$. Određuje prigušenje od $0,8\ \text{dB/km}$ na $1310\ \text{nm}$. Kabel radi na frekvencijskom pojasu od $1310\ \text{nm}$, ali može raditi i na $850\ \text{nm}$.
2. Norma ITU-T G.652 predstavlja standard monomodnog svjetlovoda dimenzija $9/125\ \mu\text{m}$ sa stepeničastim indeksom loma. Radi na drugom i trećem optičkom prozoru. Ova norma je najprimjenjivanija u svijetu. Optimizirana je za valnu duljinu od $1310\ \text{nm}$ i na njoj ima minimalnu disperziju. Može raditi i na $1550\ \text{nm}$, ali kromatska disperzija onda iznosi $17\ \text{ps/nm-km}$. Pri većim brzinama prijenosa mora se kompenzirati kromatska disperzija. Prigušenje iznosi svega $0,5\ \text{dB/km}$ na $1310\ \text{nm}$ i $0,4\ \text{dB/km}$ na $1550\ \text{nm}$. Polarizacijska disperzija iznosi oko $0,1\ \text{ps/km}$.
3. Norma ITU-T G.653 predstavlja standard za optičko vlakno s pomaknutom disperzijom i namijenjeno je za treći optički prozor. Ovaj standard je namijenjen za monomodne svjetlovođe sa stepeničastim indeksom loma valnih duljina između 1500 i $1600\ \text{nm}$. Postiže se gušenje ispod $0,35\ \text{dB/km}$.
4. Norma ITU-T G.654 je standard za monomodna optička vlakna. Pri valnoj duljini od $1550\ \text{nm}$ imaju male gubitke jer koriste čisti silicij u jezgri, ali imaju veliku kromatsku disperziju.

5. Norma ITU-T G.655 je standard za monomodno optičko vlakno s non-zero disperzijom. Može se umanjiti nelinearno izobličenje tako da se izbacuje nulta disperzija izvan trećeg optičkog prozora. Gušenje iznosi oko 0,2 dB/km, a polarizacijska disperzija 0,1 ps/km. [8]

5. MJERENJA NA KOMPONENTAMA SVJETLOVODNIH PRIJENOSNIH SUSTAVA

Svaki svjetlovodni kabel, nakon što je spojen i završen, treba provjeriti. Potrebno je ispitati njegovu neprekinutost, a nakon toga treba ispitati pogreške i probleme na njima. Ako je riječ o dugačkom svjetlovodnom sustavu s puno međuspojeva svjetlovodne niti, treba provjeriti svaki spoj. Za provjeru svjetlovodnih spojeva koristi se svjetlovodni reflektor (OTDR).

5.1. Mjerenje na svjetlovodnoj niti

Na svjetlovodnim nitima ispituju se njihove prethodno opisane značajke kao što su prigušenje, disperzija, mjesta prekida i mjesta njihovog oštećenja.

Kao što je prethodno utvrđeno, ako je mjerna valna duljina veća od kritične valne duljine jedne niti širit će se samo jedan mod. To čini mjerenje prigušenja jednomodne niti manje kompliciranom od onih na višemodnoj niti. Mjerenja jednomodnih niti treba provesti u dva koraka. Prvi korak je mjerenje izlazne snage na daljem kraju, a zatim se prereže nit na ulaznom kraju i ponovno se izmjeri snaga. Razlika tih dviju snaga je prigušenje u dB. Ova metoda se naziva metoda skraćivanja niti. Druga metoda koristi OTDR, koja zahtjeva pristup sa samo jedne strane, što je čini jako praktičnom. Širina jednomodne niti ovisi o kromatskoj disperziji. Mjerenje kromatske disperzije se vrši tako da se šalju impulsi kratkih valnih duljina kroz nit, nakon čega se mjere njihova različita vremena dolaska. Kritična valna duljina se mjeri tako da se pošalje široki spektar u kratku nit, te se nakon toga mjeri gušenje svake spektralne komponente. Kritična valna duljina vidljiva je kao diskontinuitet krivulje prigušenja.

Ispitivanje višemodnih niti je otežano zbog širenja mnogo modova, od kojih svaki ima svoje karakteristike širenja. Za mjerenje prigušenja osnova su izvori svjetlosti i mjerač snage. Postoje dvije metode mjerenja, a to su metoda skraćivanja niti i metoda povratnog raspršenja. Višemodna disperzija se pojavljuje uslijed proširenja impulsa prilikom različitih brzina širenja kod različitih modova. Nit se pobudi kratkim impulsom, u kojem su modovi ravnotežno raspoređeni, te se mjeri širina impulsa na kraju niti. Kromatska disperzija predstavlja svojstvo materijala, te doprinosi smanjenju širine opsega višemodnih niti i ne može se mjeriti neposredno.

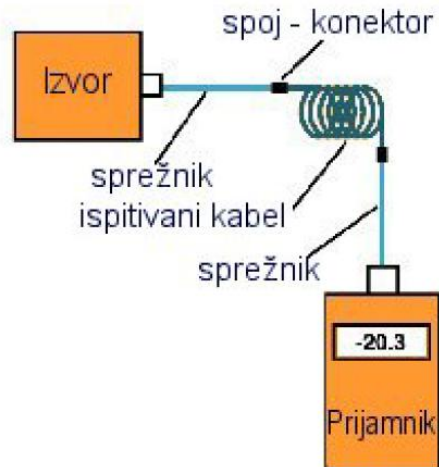
Kolika se snaga može unijeti u višemodnu nit, određuje numerički otvor (NA) i promjer jezgre. Numerički otvor definira maksimalni kut pod kojim zrake ulaze u nit, a uvijek se mjeri na izlazu iz niti jer je maksimalni kut na izlazu približno jednak kutu na ulazu.

Kako bi se mjerenje na svjetlovodnim kabelima izvršilo što kvalitetnije potrebno je sljedeće :

- svjetlosni izvor, prijarnik za mjerenje izračene snage i mjerač gubitaka na svjetlosnoj niti s pripadajućom opremom,
- određen broj kvalitetnih spreznika s pripadajućim spojnicama,
- OTDR s pripadajućom opremom za terenski rad,
- pribor za čišćenje svjetlovodnih niti i spojeva.

5.2. Mjerenje prigušenja svjetlovodne niti

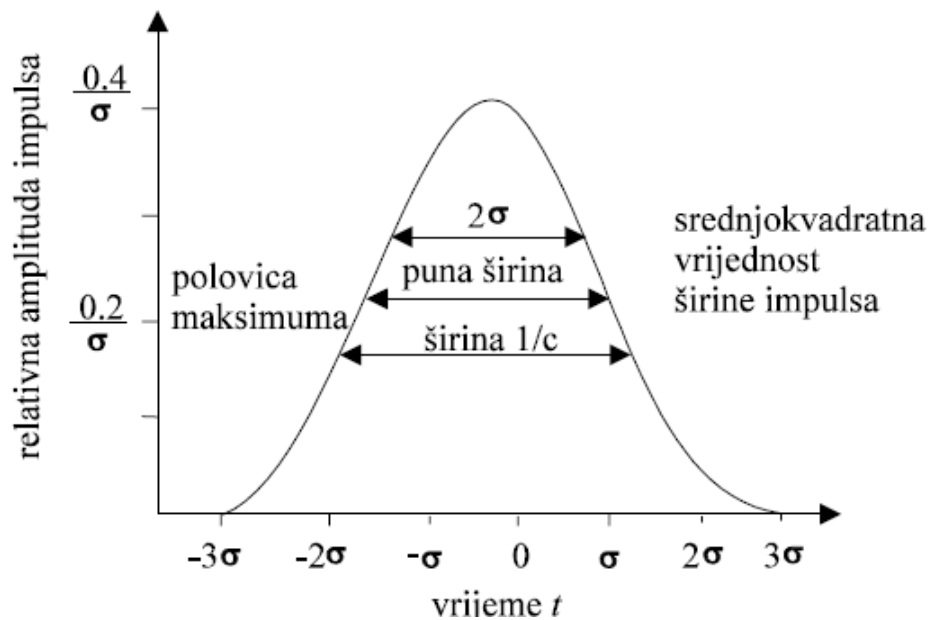
Tijekom mjerenja prigušenja svjetlovodne niti, potrebno je najprije izmjeriti izračunatu snagu. Mora se osigurati svjetlosni izvor koji će izračiti energiju u obliku elektromagnetskog vala. Snaga koja je izračena iz svjetlosnog predajnika je ustvari ulazna snaga u svjetlovodni prijenosni sustav. Apsolutna razina snage za mjerenje u svjetlovodnim sustavima iznosi jedan mW, a valne duljine elektromagnetskih valova su 850, 1310 i 1550 nm. U svjetlovodnoj tehnici snaga od jedan mW predstavlja relativnu snagu od 0 dBm. Tijekom mjerenja snage važno je imati dovoljno snažan izvor, jer u slučaju preslabog izvora, koristan signal bi na većoj udaljenosti uz veće vrijednosti prigušenja bio na razini snage šuma. Radi prevencije, potrebno je poštivati mjere zaštite očiju od laserskog zračenja. Prigušenje svjetlosne snage u svjetlovodnim nitima ovisno je o valnoj duljini zračenja koje prolazi kroz svjetlovod. Na slici 33 prikazano je mjerenje prigušenja svjetlovodne niti pomoću izvora referentne svjetlosti i prijarnika.



Slika 33. Mjerenje prigušenja svjetlovodne niti [10]

5.3. Mjerenje disperzije svjetlovodne niti

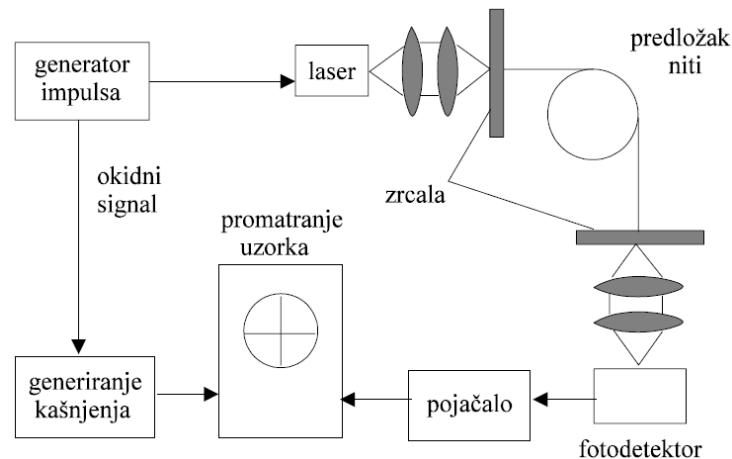
Procijenjeno je statističkim metodama prema razlici vremena prostiranja komponenata signala ili prenošenja impulsa, kao što je prikazano na slici 34.



Slika 34. Dijagram ovisnosti relativne amplitude impulsa o vremenima kojem su prikazani njegovi parametri [10]

5.3.1. Mjerenje disperzije svjetlovoda u vremenskom području

Ovo je najjednostavniji način mjerenja disperzije. Na jedan kraj svjetlovoda uvede se optički impuls, dok se na drugom kraju mjere prošireni impulsi. Za izvor svjetlosti koristi se impulsni laser valne duljine $0,9 \mu\text{m}$. Na kraju i na početku svjetlovoda nalaze se djelomično prozirna zrcala. Disperzija se određuje na osnovu uspoređivanja širine impulsa koji se vraćaju nakon uzastopnih cirkulacija u svjetlovodu sa širinom ulaznog impulsa. Impulsi se usklađuju pomoću linije kašnjenja. Na slici 35 prikazana je blok shema spoja za određivanje disperzije u vremenskom području.



Slika 35. Blok shema spoja za određivanje disperzije u vremenskom području [10]

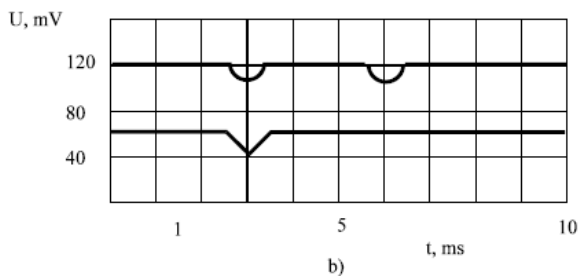
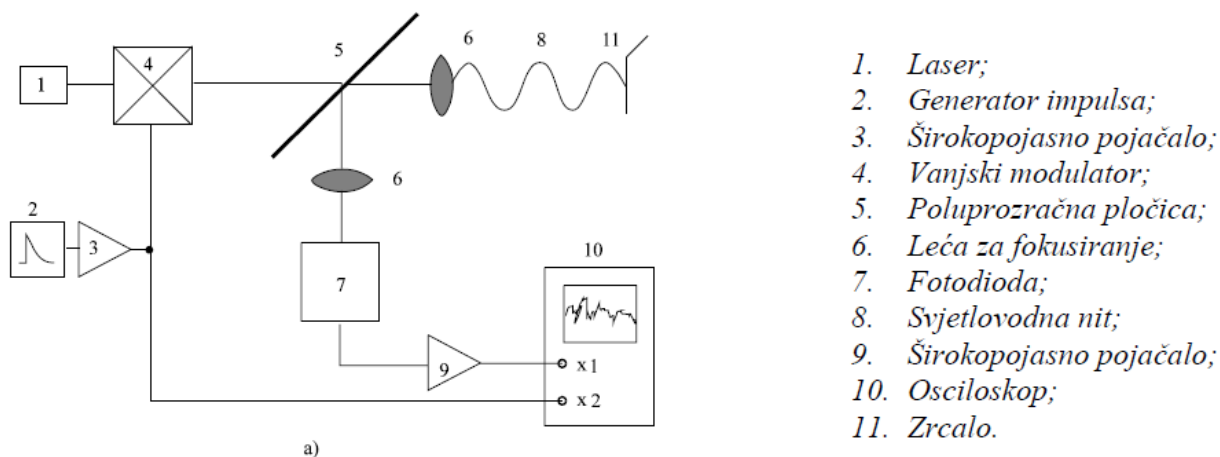
5.3.2. Mjerenje disperzije svjetlovoda u frekvencijskom području

Disperzija u frekvencijskom području daje informaciju o amplitudno-frekvencijskoj i fazno-frekvencijskoj karakteristici svjetlovoda. Te su karakteristike značajne kod projektiranja svjetlovodnih prijenosnih sustava. Tijekom mjerenja ukupne disperzije u frekvencijskom području, u svjetlovod se unosi svjetlosni signal promjenjive frekvencije, a stalne amplitude i faze. Uređaji za mjerenje navedenih karakteristika su jako precizni ali i skupi, pa se mjeri samo amplitudni odziv iz kojeg se izračunava fazni odziv. Postupak mjerenja amplitudnog odziva je vrlo jednostavan. Mjere se i uspoređuju amplitude signala na ulazu i izlazu svjetlovoda pri čemu se koristi spektralni analizator. Kao izvor svjetlosti mogu poslužiti LED ili laserske diode, čija se

svjetlost modulira strujnim signalima. Predajnik i prijammnik moraju imati podjednak frekvencijski opseg kao i svjetlovod. U protivnome može doći do pogreške pri mjerenju.

5.4. Određivanje mjesta prekida ili oštećenja svjetlovodne niti

Oštećenje svjetlovoda podrazumijeva svaku nehomogenost koja dovodi do pogoršanja prijenosnih osobina svjetlovoda. Oštećenjem svjetlovoda dolazi do njegovog prekida. Metode koje se primjenjuju slične su metodama koje se koriste kod električnih vodova. Postoje tri metode određivanja mjesta prekida, a to su mjerenje svjetlosne energije izračene u okoliš, mjerenje jakosti povratnog Rayleighovog raspršenja i impulsno lokacijske metode. Glavni problem prve metode je zahtijevanje prijamnog uređaja širokog dinamičkog raspona, što ovu metodu iziskuje iz prakse. Druga metoda se ne može koristiti za određivanje mjesta prekida svjetlovoda velikih valnih duljina, zbog niske razine tijeka povratnog raspršivanja. Impulsna metoda je najbolja metoda jer omogućuje određivanje mjesta nehomogenosti i mjesta potpunog prekida. Na slici 36 prikazana je impulsna metoda mjerenja prekida svjetlovodne niti.



Slika 36. Impulsna metoda mjerenja prekida svjetlovodne niti, a) blok shema, b) oscilogram [10]

U nit se šalje skup impulsa i na osnovi vremena potrebnog za povratak reflektiranih impulsa, određuje mjesto prekida. Kada impuls prođe kroz element za fokusiranje, svjetlosni snop lasera pada na poluprozirnu pločicu. Poluprozirna pločica razdijeli svjetlosni snop na dva dijela. Prvi putem elemenata za fokusiranje dolazi u svjetlovod, a nakon toga u uređaj koji prigušuje modove, dok se drugi reflektira od zrcala i poluprozirne pločice, te pada na prijamnik koji se sastoji od foto diode, pojačala i osciloskopa. Svjetlost koja se reflektira od mjesta prekida, vraća se po niti i preko poluprozirne pločice, također dolazi u prijamnik. Utvrđuju se razlike vremena dolaska obaju impulsa, na temelju čega se određuje udaljenost mjesta prekida.

6. ZAKLJUČAK

U okviru rada razmotrene su značajke svjetlovodnih prijenosnih sustava. Razvoj svjetlovodnih vlakana, doveo je do njihove velike raširenosti. Svjetlovodi su u današnje vrijeme postali standard za sve telekomunikacijske sustave. Svoju široku primjenu stekli su zahvaljujući kvalitetnim prijenosnim karakteristikama, malim dimenzijama i otpornošću na vanjske utjecaje. Zakoni optike predstavljaju temelj na osnovu kojeg se odvija prijenos signala pomoću svjetlovoda. Svjetlovodnim prijenosnim sustavom mogu se prenijeti znatno veće količine podataka, nego što je to slučaj kod radio i telefonske komunikacije. Tijekom projektiranja svjetlovoda, prigušenje predstavlja najvažniju karakteristiku, dok ostale karakteristike nemaju toliko značajan utjecaj na prijenosna svojstva. Prigušenje svjetlovoda uglavnom nastaje zbog nečistoća unutar svjetlovoda ili zbog savijanja svjetlovoda, što dovodi do raspršenja svjetlosnih zraka. Utjecaj na prigušenje ima još i vrsta materijala, kao i vrsta vlakana koja je primjenjuje. Valna duljina svjetlosti koja se koristi za prijenos, također ima značaj utjecaj na prigušenje. U današnje vrijeme proizvedena su vlakna kojima se prigušenje bliži teoretskoj vrijednosti. Prethodnom analizom je utvrđeno, kako jednomodni svjetlovodi imaju najmanje prigušenje u odnosu na višemodne svjetlovođe s gradijentnim indeksom loma svjetlosti i one sa skokovitom promjenom indeksa loma svjetlosti. Višemodni svjetlovodi imaju veće prigušenje i vremensku disperziju, pa se shodno tome, takvi svjetlovodi koriste za povezivanje do 5 km. Karakterizira ih niska cijena, dok su jednomodni svjetlovodi skuplji i kvalitetniji. Jednomodni svjetlovodi nemaju gubitke zbog zagrijavanja i nema raspršivanja u vremenu zbog različitog prolaska puta zraka. Koriste se tamo gdje je potrebna velika brzina i kapacitet prijenosa podataka. Višemodni svjetlovodi imaju oko 50 puta manju brzinu prijenosa podataka od jednomodnih svjetlovoda. Najrašireniji svjetlovodi danas s obzirom na korišteni materijal, su oni izrađeni od stakla. Svjetlovodi izrađeni od plastičnih masa imaju veliko prigušenje i većih su dimenzija, ali je njihova primjena česta u industriji zbog niske cijene. Kao zaštitni omotač najbolje je koristiti polučvrsti omotač koji povezuje sva dobra svojstva labavog i čvrstog omotača. Konektor predstavlja najkritičnije mjesto na svjetlovodu (mjesto gušenja). Iz prethodnih razmatranja može se zaključiti kako svjetlovod mora biti što manje proziran kako bi se smanjili gubici tijekom prijenosa svjetlosnog signala. Može se zaključiti i kako je kao optički predajnik najbolje koristiti LED diodu, koja je jeftinija i više pouzdana od LD diode.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
E	V/m	Jakost električnog polja
dS	m^2	Diferencijal zatvorene površine
dV	m^3	Diferencijal zatvorenog volumena
ρ	kg/m^3	Gustoća električnog naboja
ϵ_0	As/Vm	Dielektična konstanta vakuuma
B	kg/s^2A ili T	Jakost magnetskog polja
t	s	Vrijeme
J	A/m^2	Gustoća električne struje
μ_0	$kg\ m/s^2A^2$ ili T m/A	Permeabilnost vakuuma
α	°	Upadni kut
β	°	Kut loma
v	m/s	Brzina svjetlosti u nekom sredstvu
n	-/-	Indeks loma
c	m/s	Brzina svjetlosti u vakuumu
s	m	Put koji prevaljuje svjetlost
a	-/-	Koeficijent apsorpcije
t	-/-	Koeficijent transmisije
r	-/-	Koeficijent refleksije
δ_{min}	°	Kut najmanje devijacije
u_1	°	Kut ulazne zrake
u_2	°	Kut izlazne zrake
A	°	Kut optičke prizme
d	m	Debljina planparalelne ploče

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz pravocrtnog širenja svjetlosti [3]	5
Slika 2. Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova.....	6
Slika 3. Zakon refleksije ili odbijanja svjetlosti [3]	7
Slika 4. Zakon loma ili refrakcije [4]	8
Slika 5. Prelazak svjetlosti iz rjeđeg u gušće sredstvo [4]	8
Slika 6. Prelazak svjetlosti iz gušćeg u rjeđe sredstvo [4]	8
Slika 7. Konstruktivna interferencija [6].....	11
Slika 8. Destruktivna interferencija [6].....	11
Slika 9. Youngov pokus [6]	11
Slika 10. Ogib svjetlosti [6]	12
Slika 11. Polarizacija kod refleksije svjetlosti [6].....	13
Slika 12. Foto-električni efekt [6]	13
Slika 13. Preslikavanje točke [4].....	14
Slika 14. Preslikavanje predmeta [4]	14
Slika 15. Lom zrake na planparalelnoj ploči [4].....	15
Slika 16. Optička prizma [4]	16
Slika 17. Totalna refleksija [4].....	17
Slika 18. Višemodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma [9].....	20
Slika 19. Višemodni svjetlovod s gradijentnim indeksom loma [9].....	21
Slika 20. Jednomodni svjetlovod sa stepeničastim indeksom loma [9].....	21
Slika 21. Dimenzije svjetlovodnih niti [9].....	22
Slika 22. Silicijev dioksid- kvarc [8]	23
Slika 23. Vrste zaštitnih omotača [9].....	24
Slika 24. Glavni dijelovi svjetlovoda [9]	25
Slika 25. Sustav prijenosa signala pomoću svjetlovoda [7].....	26
Slika 26. Klasični optički modul [7].....	28
Slika 27. Žljebasti optički modul [7]	28
Slika 28. Optička vlakna s obzirom na raspored modula unutar kabela [8]	29

Slika 29. Svjetlovodni kabel sa žljebastim pakiranjem i čeličnim užetom [8]	29
Slika 30. Prigušenje u ovisnosti o valnoj dužini [8].....	32
Slika 31. Optički prozori [8]	33
Slika 32. Polarizacijska disperzija [8].....	36
Slika 33. Mjerenje prigušenja svjetlovodne niti [10].....	42
Slika 34. Dijagram ovisnosti relativne amplitude impulsa o vremenima kojem su prikazani njegovi parametri [10].....	42
Slika 35. Blok shema spoja za određivanje disperzije u vremenskom području [10].....	43
Slika 36. Impulsna metoda mjerenja prekida svjetlovodne niti, a) blok shema, b) oscilogram [10]	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Diferencijalni i integralni oblici Maxwellovih jednadžbi [1]	4
-------------------------------------------------------------------------------	---

LITERATURA

[1]

https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCUQFjABahUKewizws-MvufGAhUBDCwKHfNdB-U&url=http%3A%2F%2Fwww.fizika.unios.hr%2Fof2%2Fwp-content%2Fuploads%2Fsites%2F33%2F2015%2F02%2F12-Maxwellove_jednadzbe.pdf&ei=5b6rVfO7CIGYsAHzu52oDg&usg=AFQjCNEZuN5WoFJ-xov4zXiMEvqJ55LzPA&bvm=bv.98197061,d.bGg&cad=rja

[2]

https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CFIQFjAJahUKewj3-5ucg_LGAhXE2CwKHZbSBZg&url=http%3A%2F%2Fwww.irb.hr%2Fusers%2Fcapan%2Foptika.ppt&ei=jUWxVbeBEcSxswGWpZfACQ&usg=AFQjCNHV-GnURgDDpdZtLZiwLJJtD6qjKg&bvm=bv.98476267,d.bGg&cad=rja

[3]

https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCgQFjACahUKewjEz9fT9_DGAhUD8HIKHTeeB40&url=https%3A%2F%2Fwww.fer.unizg.hr%2F_download%2Frepository%2FGeometrijska_optika.pdf&ei=NLOwVcTIJoPgywO3vJ7oCA&usg=AFQjCNF0JNhEleXERxeHd79dg1qm0XJ-dw&bvm=bv.98476267,d.bGQ&cad=rja

[4]

<http://sr.scribd.com/doc/140479647/GEOMETRIJSKA-OPTIKA-skripte#scribd>

[5]

<http://pgs.blogger.index.hr/post/35fizikalna-optika/16828988.aspx>

[6]

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0CBsQF>

[jAAahUKEwjlo-](#)

[7Xu_PGAhUUCNsKHRjYBv8&url=http%3A%2F%2Fzvu.hr%2F~msusak%2Ffizikalna%2520optika.pdf&ei=-gayVeW-](#)

[HZSQ7AaYsJv4Dw&usg=AFQjCNH1eDPe2cVn1gov0mTmARiHGZdzcw&sig2= iJqMI122rO1nwHFkU8gfw&bvm=bv.98476267.d.bGQ&cad=rja](#)

[7]

<https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCIQFjABahUKEwjQn9u55PbGAhXLhSwKHSZjALY&url=http%3A%2F%2Fwww.fpz.unizg.hr%2Fztos%2Fprsus%2Fsvjetlovodi.pdf&ei=YMSzVdDvE8uLsgGmxoGwCw&usg=AFQjCNETFJi3xIDWIYng90Ts1NNzKdUoRQ&bvm=bv.98717601.d.bGg>

[8]

Marasović Joško, Svjetlovodi, seminarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2015

[9]

CARNet CERT u suradnji s LS and S, Sigurnost i svjetlovodi, Zagreb, 2007

[10]

[\[04XHAhVJCCwKHb5GCzU&url=http%3A%2F%2Fwww.fpz.unizg.hr%2Fztos%2FMJE%2Foptika11.pdf&ei=YJC7VauQL8mQsAG-\]\(#\)](https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAAahUKEwirwKL-</p></div><div data-bbox=)

[ja2oAw&usg=AFQjCNH5RV46S8k4pL09YLjtnLP4hrpFCw&sig2=KGRf3fBzac3p11-44JsjUQ&bvm=bv.99261572.d.bGg](#)

METAPODACI

Naslov rada: Analiza značajki svjetlovodnih prijenosnih sustava

Autor: Luka Ostrički

Mentor: prof.dr.sc.Slavko Šarić

Naslov na drugom jeziku (engleski): Analysis of features of optical transmission systems

Povjerenstvo za obranu:

- izv.prof.dr.sc. Dragan Peraković predsjednik
- prof.dr.sc. Slavko Šarić mentor
- dipl.ing. Ivan Forenbacher član
- prof.dr.sc. Zvonko Kavran zamjena

Ustanova koja je dodjelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: zavod za informacijsko telekomunikacijski promet

Vrsta studija: s veučilišni

Naziv studijskog programa: Promet

Stupanj: preddiplomski

Akademski naziv: univ.bacc.ing.traff.

Datum obrane završnog rada: 15.9.2015.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Analiza značajki svjetlovodnih prijenosnih sustava , na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 7.9.2015.

Luka Ostrički