Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

Matej Mikanec

## Lomni liki in disperzija optičnih valovodov

Diplomsko delo

Mentor: doc. dr. Boštjan Batagelj, univ. dipl. inž.

Ljubljana, September 2016

## Zahvala

Zahvalil bi se mentorju doc. dr. Boštjanu Batagelju za pomoč pri izdelavi diplomske naloge, za dostop do literature, odzivnost na moja vprašanja in vse koristne nasvete, ki sem jih dobil. Zahvala gre tudi zaposlenim v podjetju Optacore d.o.o., za priložnost in možnost vpogleda v izdelavo in merjenje optičnih surovcev in vlaken, ter še posebej Luki Perparju za znanje in praktične nasvete, ki sem jih pridobil v času našega sodelovanja.

Nazadnje bi se zelo rad še zahvalil družini in prijateljem, ki so me podpirali med študijem.

#### Povzetek

Diplomska naloga opisuje različne oblike lomnih likov in tipe disperzij ter kako ti dejavniki vplivajo na širjenje svetlobe po optičnem vlaknu. Soočamo se z različnimi ovirami in problemi, ki onemogočajo implementacijo mnogorodovnih vlaken pri daljših valovnih dolžinah. Izdelava takih vlaken je ključen način pri izboljšavi komunikacijskih sistemov, kar bo tudi tekom te naloge dokazano.

Za lažje razumevanje se je potrebno seznaniti z osnovnimi pojmi v svetu optičnih komunikacij. Širjenje svetlobe po optičnem vlaknu in učinek slabljenja sta ključna za nadaljnjo predstavo. Velik vpliv na zmogljivost in učinkovitost optičnih vlaken ima tudi njihova izdelava, saj se je predhodno potrebno seznaniti z različnimi kemijskimi procesi in uporabljenimi materiali. Problem širjenja svetlobe po vlaknu, oblike lomnih likov, disperzije in možnosti implementacije pri daljših valovnih dolžinah se lotimo s pomočjo različnih enačb in opisov opravljenih simulacij.

Ugotovimo, da je implementacija mnogorodnih vlaken mogoča z uporabo algoritmov in različne opreme. Implementacija sistemov z mnogorodovnimi vlakni, ki delujejo pri valovnih dolžinah od 1300 do 1550 nm, bi bila korak v pravo smer, saj so učinkovitejši in cenejši od sistemov z enorodovnim vlaknom.

Ključne besede: lomni liki, disperzija, mnogorodovna vlakna, optične komunikacije

#### Abstract

This thesis describes different index profiles and types of dispersion and how these factors contribute to light propagation in an optical fiber. We confront different obstacles and problems, which prevent the implementation of multimode fibers that operate at longer wavelengths. Manufacturing these types of fibers is a key way to improving the communication systems, which we will prove during the course of this paper.

For easier understanding, It is important to familiarize ourselves with the basic concepts of optic communications. To understand light propagation and the effect of attenuation of an optical fiber is key for further comprehension. A big influence on performance and efficiency of an optical fiber is It's manufacturing process, where we need to acquaint ourselves with different types of chemicals procedures and materials. We confront the problems of light propagation, different profile shapes, types of dispersion and the possibility of implementing multimode fibers at longer wavelengths with different equations and detailed descriptions of simulations.

We concur, that the implementation of these fibers is indeed possible with the use of algorithms and different equipment. Implementation of systems that use multimode fibers that work at wavelengths ranging from 1300 to 1550 nm would be a step in the right direction, because they are more efficient and cheaper to install than singlemode fibers.

Key words: index profiles, dispersion, multimode fibers, optic communications

## Kazalo vsebine

Uvod v optične komunikacije2					
1. Osnove o optičnih vlaknih					
1.1.	Prei	našanje svetlobe po optičnem vlaknu	5		
1.	1.1.	Odboj, lom in uklon svetlobe	5		
1.	1.2.	Lomni količnik	6		
1.	1.3.	Notranji odboj	7		
1.	1.4.	Numerična apartura	7		
1.2.	Pod	ročje delovanja	8		
1.3.	Slał	oljenje	9		
1.	3.1.	Rayleighjevo in Miejevo sipanje	10		
2. Iz	delava	a optičnih vlaken	12		
2.1.	Pos	topek izdelave surovcev	12		
2.2.	Vle	čenje vlakna iz surovcev	14		
2.3.	Osta	ali postopki izdelave	15		
3. Vpliv lomnih likov na širjenje svetlobe v vlaknu					
3.1.	Stop	pničasti lomni lik	17		
3.2.	Gra	dientni lomni lik	22		
3.	2.1.	Numerična apartura v gradientnem lomnem liku	26		
3.	2.2.	Parabolični lomni lik	27		
3.	2.3.	Oblike lomnih likov	28		
4. Disperzija in njen vpliv na izdelavo vlaken					
4.1.	Nek	rromatska disperzija	31		
4.	1.1.	Mnogorodovna disperzija	31		

4.	1.1.1.	Disperzija pri stopničastem profilu	32
4.	.1.1.2.	Disperzija pri paraboličnem profilu	34
4.	.1.1.3.	Disperzija pri optimalnem profilu	35
4.	1.1.4.	Optimiziranje lomnega lika in izbira materiala	36
4.1.2	2. Pola	arizacijska disperzija	38
4.2.	Kromats	ka disperzija	39
4.2.1	1. Sno	vna disperzija	39
4.2.2	2. Val	ovodna disperzija	40
4.3.	Disperzi	jsko spremenjena vlakna	41
4.3.1	1. Dis	perzijsko premaknjena vlakna	42
4.3.2	2. Dis	perzijsko izravnana vlakna	43
4.3.3	3. Kor	npenzacija disperzije	44
5. Mnogo	orodovna	a vlakna in implementacija pri daljših valovnih dolžinah	. 45
5.1.	Prostors	ki svetlobni modulator (SLM)	45
Zaključek	k		. 52
Literatura	a in viri .		. 53

## Seznam slik

Slika 1: Struktura optičnega vlakna
Slika 2: Elektromagnetni spekter4
Slika 3: Odboj svetlobnega žarka med jedrom in oblogo5
Slika 4: Prikaz kritičnega odboja žarka7
Slika 5: Sprejemni stožec optičnega vlakna
Slika 6: Slabljenje v optičnem vlaknu10
Slika 7: Slabljenje v vlaknu narejeno iz čistega SiO2 - GeO2 stekla11
Slika 8: Slikovni prikaz MCVD sistema za izdelavo surovca
Slika 9: Steklopihaška stružnica
Slika 10: Slikovni prikaz vlečenja optičnega vlakna iz steklenega surovca 15
Slika 11: Stopničasti profil vlakna17
Slika 12: Potovanje žarka v vlaknu s stopničastim profilom
Slika 13: Način odboja žarka pri stopničastem profilu19
Slika 14: Potovanje žarka, ki se popolno odbije in delno odbije20
Slika 15: Dolžina poti Lp in polperioda žarka Zp21
Slika 16: Gradientni profil vlakna
Slika 17: Prikaz poti žarka s spremenljivim lomnim količnikom23
Slika 18: Omejeni in lomni žarek pri gradientnem lomnem liku
Slika 19: Žarek, ki v gradientnem lomnem liku opravi poti v obliki sinusoida 25
Slika 20: Sprejemni kot pri vlaknu z gradientnim lomnim likom
Slika 21: Geometrija in profil lomnega lika gradientnega vlakna27
Slika 22: Parameter stopnjevanja pri gradientnem lomnem liku28
Slika 23: Tipi disperzij [18]31
Slika 24: Razširitev impulzov pri mnogorodovni disperziji

Slika 25: Disperzija pri stopničastem profilu v odvisnosti od lomnega količnika 33
Slika 26: Disperzija paraboličnega lomnega lika v odvisnosti od lomnega količnika [14]
Slika 2/: Disperzija optimalnega lomnega lika v odvisnosti od lomnega kolicnika
[14]
Slika 28: Parameter optimalnega profila za dve kombinaciji materialov
Slika 29: Parameter optimalnega profila za več materialov
Slika 30: Snovna disperzija različnih snovi v odvisnosti od valovne dolžine [13]40
Slika 31: Značilnosti disperzije za različna enorodovna vlakna
Slika 32: Izvedba oblik lomnih likov za disperzijsko premaknjena vlakna43
Slika 33: Oblike lomnih likov značilnih za disperzijsko izravnana vlakna43
Slika 34: Prilagojeni prenosni sistem
Slika 35: Nastavitve SLM po prilagoditvi z naključnim spojem48
Slika 36: Nastavitve SLM po prilagoditvi z zamikom od centra
Slika 37: Amplituda in faza SLM po prilagoditvi z visoko prostorsko resolucijo 50
Slika 38: Impulzni odziv pred in po prilagoditvi z vzbujanjem enega PM51

## Seznam uporabljenih simbolov

a	Slabljenje optičnega vlakna	dB/km
c	Hitrost svetlobe v mediju	m/s
c <sub>0</sub>	Svetlobna hitrost	$3 \times 10^{8} \text{ m/s}$
D	Kromatska disperzija	ps/(nm km)
f	Frekvenca	Hz
k	Valovno število	rad/nm
L	Dolžina	m
L <sub>p</sub>	Dolžina poti	m
Lo	Dolžina optične poti	m
М	Število odbojev	Vred.
NA	Numerična apartura	Vred.
n	Lomni količnik	Vred.
Ν	Število rodov	Vred.
n <sub>co</sub>	Lomni količnik jedra	Vred.
n <sub>cl</sub>	Lomni količnik obloge	Vred.
р	Parameter stopnjevanja	Vred.
r	polmer	m
Zp	Polperioda žarka	m
t	Čas potovanja žarkov po optični poti	S
V	Celotno število rodov, ki jih vlakno lahko prenese	Vred.
δλ/λ	Relativna spektralna širina izvora	Vred.
$\Delta \tau$	Čas razširitve impulza pri nekromatski disperziji	ns/km
β	Širjenje žarkov	Vred.
$\theta_{c}$	Kritični kot	0
$\theta_{\rm r}$	Odbojni kot	0
θi	Sprejemni kot	0
$\theta_z$	Komplementarni kot	0
λ	Valovna dolžina	nm ali µm
Δ	Lomni parameter	Vred.

BER	Angl. Bit error ratio	Razmerje napačnih bitov
CDS	Angl. Chelate delivery system	Helatni dostavni sistem
IM	Angl. Ideal modes	Idealni rodovi
ISI	Angl. Intersymbol interference	Intersimbolna interferenca
LAN	Angl. Local area network	Lokalno omrežje
LED	Angl. Light emitting diodes	Diode s svetlobnim
		oddajanjem
MCVD	Angl. Modified chemical vapor	Depozicija s
	deposition	spremenjenim kemičnim
		izparevanjem
MMF	Angl. Multimode fiber	Mnogorodovno vlakno
OCVD	Angl. Outside chemical vapor deposition	Depozicija z zunanjim
		kemičnim izparevanjem
PM	Angl. Principal modes	Glavni rodovi
SMF	Angl. Singlemode fiber	Enorodovno vlakno
VAD	Angl. Vapor axial deposition	Depozicija z izparevanjem
		po osi
VCSEL	Angl. Vertical-cavity surface emitting	Laser, ki oddaja svetlobo
	laser	po vertikalni površini

## Uvod v optične komunikacije

Misel o prenosu svetlobe preko medija je tema, o kateri se je veliko govorilo že v sredini 20. stoletja. Čeprav so optična vlakna prišla v uporabo šele pred kratkim, so že v samem začetku poskušali najti načine, ki bi omogočali izkoriščanje svetlobe za prenos podatkov. Vzrok za to je bila predvsem ugotovitev, da je frekvenčna pasovna širina v optičnih komunikacijah dosti večja, v primerjavi z radijskimi komunikacijami. Sprva so poskušali pošiljati informacije preko svetlobnih valov po ozračju, vendar so ugotovili, da to ne bo mogoče predvsem zaradi različnih naravnih pojavov kot so dež, megla, sneg in podobno. Zato so se osredotočili na izdelavo fizičnega medija in temu mediju danes pravimo optična vlakna. Optična vlakna danes uporabljamo v večini za telekomunikacijske namene, saj lahko prenašajo več informacij kot pa njihovi predhodniki, bakreni vodniki. Uporabljajo se tudi pri izdelavi laserjev, zelo uporabna so tudi v ostalih industrijskih panogah.

Eden glavnih razlogov za izdelavo učinkovitega optičnega vlakna je tudi njegov potencial za razvoj. Poznamo veliko različnih materialov, ki jih lahko dodamo čistemu steklu za manipulacijo lomnih količnikov in valovnih dolžin. Poznamo tudi različne oblike lomnih likov, ki vplivajo na širjenje svetlobe po optičnih vlaknih. Vsaka stvar pa ima tudi slabe lastnosti in v primeru optičnih vlaken poznamo slabljenje in disperzijo, ki jih je tudi mogoče kontrolirati. Glede na vse, poznamo samo dva tipa vlaken, in sicer enorodovna in mnogorodovna, ki se poleg opaznih fizičnih lastnosti razlikujeta tudi pri uporabi in ceni. Pri optičnih omrežjih je zelo pomembno, da so ta zanesljiva in poceni, kar pomeni, da implementacija enorodovnih vlaken ni najboljša rešitev. Ena od prednosti enorodovnih vlaken je, da delujejo pri daljših valovnih dolžinah, kjer sta meji slabljenja in disperzije najmanjši. V tej diplomi so predstavljeni različni vzroki in dejavniki, ki preprečujejo delovanje mnogorodovnih vlaken pri daljših valovnih dolžinah. Predstavljene so tudi ideje, kako se lahko tem oviram izognemo.

## 1. Osnove o optičnih vlaknih

Pri optičnih komunikacijah govorimo o svetlovodih. Poznamo dva tipa svetlovodov, in to sta planarni svetlovod in krožno-simetrični svetlovod. Prvi se uporablja za izdelavo kratkih optičnih naprav, ki segajo do nekaj centimetrov, drugi pa se uporablja za vodenje svetlobe po dolgih razdaljah. Krožnosimetričnemu svetlovodu rečemo tudi optično vlakno [1]. Optična vlakna so vlakna narejena iz stekla ali plastike, ki delujejo tako, da prenašajo svetlobo iz enega dela na drugega, z majhnimi izgubami moči, tudi na zelo velike razdalje. So zelo tanka, večina okoli 250 µm, kar je približno toliko, kot je debelina enega človeškega lasu. Tipično optično vlakno je sestavljeno iz treh slojev. To so: jedro (angl. Core), po katerem se prenaša svetloba iz enega konca na drugega; obloga (angl. Cladding), ki podpira strukturo valovoda in ima malo nižji lomni količnik. Če je obloga zmerno debela lahko tudi zmerno zmanjša izgube sevanja v okolico [2]. Nazadnje še plašč (angl. Jacket), ki ščiti celotno vlakno pred odrgninami, praskami in drugimi fizičnimi poškodbami, ki bi lahko povzročile neučinkovit prenos svetlobe po vlaknu. Slika 1 prikazuje strukturo standardnega optičnega vlakna.



Slika 1: Struktura optičnega vlakna

Optična vlakna uporabljamo pri telekomunikacijah in računalniških omrežjih, ker so fleksibilna in jih lahko dajemo v snope, tako kot kable. Kot sem že omenil, je glavna prednost optičnih vlaken pred bakrenimi kabli ta, da so zelo uporabna na večjih razdaljah, predvsem zaradi zelo majhnih izgub in s tem imajo dosti večjo pasovno širino. Uporabljamo jih tudi pri senzorjih in za prenos moči. Kot vemo, ima svetloba svoj optični spekter. Optični spekter je del elektromagnetnega spektra, ki predstavlja celotno območje elektromagnetnega valovanja. Ta spekter je sestavljen iz valovne dolžine oziroma frekvence elektromagnetnih valov. Te elektromagnetne valove prikazuje slika 2, in sicer jih delimo na radijske, mikrovalove, infrardeče valove, vidno svetlobo, ultravijolične valove, rentgenske žarke in gama žarke [1]. Poleg kremenovega stekla ali silicijevega dioksida (angl. Silica), ki je glavna sestavina optičnih vlaken, lahko optičnim vlaknom dodajamo tudi druge snovi ali spojine. Vse te snovi, ki se jih uporablja za izdelovanje optičnih vlaken imajo svoje valovno-dolžinske lastnosti. Valovna dolžina, ki jo merimo v metrih, je točno določena, ko govorimo o optičnih vlaknih. Ta sega od približno 0,8 µm do 1,55 µm, ki je področje infrardeče svetlobe na elektromagnetnem spektru, kar prikazuje slika 2. Poznamo le nekaj materialov ali snovi, ki imajo ustrezne valovno-dolžinske lastnosti in kot take ustrezajo za izdelavo optičnih vlaken. Te snovi bom podrobneje opisal pri poglavju o izdelavi surovcev za optična vlakna.



Slika 2: Elektromagnetni spekter

#### 1.1. Prenašanje svetlobe po optičnem vlaknu

Kot sem omenil v prejšnji točki, se svetloba po optičnem vlaknu prenaša striktno samo po njegovem jedru. Lahko pa pride tudi do pojava, da se svetlobni žarki izgubijo in odbijejo iz jedra v oblogo, kar pomeni, da lahko pride na koncu do večjega slabljenja in zmanjšanja moči svetlobe. V naslednjih točkah bom opisal, računsko potrdil in slikovno uprizoril prenašanje svetlobe po jedru optičnega vlakna.

#### **1.1.1. Odboj, lom in uklon svetlobe**

Pri odboju svetlobe se žarek, ki potuje skozi medij z določeno gostoto zaleti v medij z različno gostoto, od tistega po katerem potuje in se lahko popolnoma ali delno odbije od meje obeh medijev, kot prikazuje slika 3 [3].



Slika 3: Odboj svetlobnega žarka med jedrom in oblogo

Pri lomu žarek popolnoma ali delno preide v medij različne gostote od tistega po katerem potuje in spremeni smer v primerjavi s smerjo iz prejšnjega medija. Odbito valovanje ima tudi manjšo količino energije.

#### 1.1.2. Lomni količnik

Svetloba v osnovi potuje z različnimi hitrostmi v različnih medijih. Gostejši je medij, počasneje se bo svetloba gibala. Uveljavljena je bila mera za vključevanje teh faktorjev, ki je povezana z gostoto materiala in s hitrostjo svetlobe skozi ta material. Temu rečemo lomni količnik (angl. Refractive index). Mera, za katerikoli material, je narejena v povezavi s hitrostjo svetlobe v vakuumu, ki jo matematično zapišemo kot:

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\text{hitrost svetlobe v vakuumu}}{\text{hitrost svetlobe v mediju}}$$
(1.1)

Večji kot je lomni količnik, gostejši je material medija. Ko žarek svetlobe preide iz enega medija v drugega, kjer imata vsak svoj lomni količnik, bo uklonski kot različen od kota loma svetlobe. Žarek svetlobe, ki bo vstopil v medij z manjšim lomnim količnikom, bo izstopil pod kotom, ki je večji od tistega s katerim je žarek vstopil v medij. Žarek, ki bo vstopil v medij z višjim lomnim količnikom, bo izstopil pod kotom, ki je manjši od tistega s katerim je vstopil v medij [3]. V tem primeru je  $\theta_1$  kot vstopa žarka in  $\theta_2$  lomni kot.

Povezavo med lomom svetlobe, ki potuje skozi različne medije, je že leta 1621 opisal nizozemski matematik Willebrod van Roijen Snell, z naslednjo enačbo:

$$n_{co}\sin(\theta_1) = n_{cl}\sin(\theta_2)$$
(1.2)

Kjer sta  $n_{co}$  in  $n_{cl}$  lomna količnika obeh medijev ter  $\theta_1$  in  $\theta_2$  kota lomov svetlobe v obeh medijih. S čimer lahko predpostavimo:

$$\frac{n_{co}}{n_{cl}} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{c_1}{c_2}$$
(1.3)

Kjer sta  $c_1$  in  $c_2$  hitrosti potovanja svetlobe v obeh medijih [3].

#### 1.1.3. Notranji odboj

Ko svetloba potuje iz enega medija v drugega z različno gostoto, se določena količina svetlobe odbije. Ta pojav je najbolj izrazit, ko svetloba potuje iz medija z višjo gostoto, v medij z nižjo gostoto. Točna količina svetlobe, ki se odbije je odvisna od stopnje razlike lomnega količnika in vpadnega kota.

Če vpadni kot povečamo, se kot loma poveča z večjim razmerjem. Pod določenim kotom ( $\theta_c$ ), bo lomni žarek imel večji kot loma, ki bo dosegel 90°. Temu kotu rečemo kritični kot (angl. Critical angle), ki ga prikazuje slika 4. Žarki, ki majo odbojni kot večji od kritičnega kota, se bodo popolnoma odbili. Teoretično notranji odboji odbijejo 100% svetlobe, v praksi pa se odbije približno 99,9% svetlobe [2], [3].



Slika 4: Prikaz kritičnega odboja žarka

#### 1.1.4. Numerična apartura

Ena najpomembnejših lastnosti dielektričnega valovoda je numerična odprtina (angl. Numerical aparture). Numerično aparaturo označimo z NA in predstavlja velikost kotne odprtine, skozi katero morajo žarki vstopati v vlakno, da so v njem ujeti. Ti žarki zadoščajo pogoju notranjega odboja na meji med jedrom in oblogo [1]. Matematično jo definiramo kot:

$$NA = \sin(\theta_1) \tag{1.4}$$

$$NA = \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)}$$
(1.5)

$$NA = n_{co} \sin(\theta_2) \tag{1.6}$$

Glede na to, da je vlakno cilindrične oblike, potrebujemo geometrijski stožec pri vhodu vlakna. Za svetlobo, ki bo vstopala v vlakno skozi ta stožec velja, da bodo vsi svetlobni žarki zadeli oblogo pod večjim kotom od kritičnega kota in s tem omogočili uspešen prenos svetlobe po vlaknu. Temu pojavu rečemo sprejemni stožec (angl. Acceptance cone), ki je narisan v sliki 5.

Polovičnemu kotu  $\theta_1$  tega sprejemnega stožca rečemo tudi sprejemni kot (angl. Acceptance angle) [2], [3]. Vrednost tega kota je odvisna od lomnih količnikov jedra, obloge in zraka ali iz katerega koli materiala je svetlobni izvor. Svetlobni žarek, ki pride v jedro z večjim kotom kot  $\theta_1$  se bo razpršil v oblogo. Svetlobni žarek, ki pride v jedro z  $\theta_1$  pa se bo popolnoma odbil pod kritičnim kotom  $\theta_c$ .



Slika 5: Sprejemni stožec optičnega vlakna

#### 1.2. Področje delovanja

Kot sem omenil na začetku tega poglavja, vidna svetloba zajema široko območje frekvenc. Pri optičnih vlaknih govorimo o območju, ki deluje v infrardečem prostoru elektromagnetnega spektra. V tem področju frekvenc ima optično vlakno zelo nizko slabljenje. Pri sliki (8) vidimo, da imamo tri padce v krivulji slabljenja pri 0,85 μm, 1,3 μm in 1,55 μm. Tem točka pravimo spektralna okna (angl. Operating windows). To so področja pasovne širine, kjer lahko zagotovimo zanesljiv prenos svetlobe po vlaknu po dolgih razdaljah zaradi nizkega slabljenja.

Prvo spektralno okno pri 0,85 µm je bilo uporabljeno, ker so bili prenosni izvori in sprejemni detektorji enostavni za izdelavo ter zelo učinkoviti. To spektralno okno se še vedno uporablja pri sistemih za kratke razdalje, ker so prenosne in sprejemne naprave dokaj poceni. Tipičen razpon slabljenja pri tej valovni dolžini dosega od 2 do približno 3,2 dB/km.

Za večino optičnih sistemov velja, da se uporablja drugo spektralno okno, ki deluje pri valovni dolžini 1,3 µm, ker so splošne izgube manjše kot pri 0,85 µm. Tipičen razpon slabljenja za to spektralno okno sega od 0,3 do 0,9 dB/km. Svetlobni izvori so, za razliko od izvorov pri prvem spektralnem oknu, zelo dragi in tudi njihova izdelava bolj komplicirana. Zato to spektralno okno uporabljamo pri visoko-hitrostnem prenosu podatkov na dolge razdalje.

Tretje spektralno okno, ki deluje pri valovni dolžini 1,55 µm, pa ima še manjše slabljenje kot drugo spektralno okno. Tipičen razpon slabljenja tega spektralnega okna seže od 0,15 do 0,6 dB/km [3]. Problem tega spektralnega okna je, da prenosne in sprejemne naprave niso tako napredne ali učinkovite kot tiste, ki jih uporabljamo v drugem spektralnem oknu. Sreča tretjega spektralnega okna je, da prav za te valovne dolžine obstaja optični ojačevalnik, ki omogoča prenos signalov na večje razdalje.

#### 1.3. Slabljenje

Slabljenje ali izguba podatkov med prenosom pri optičnih vlaknih je eden najpomembnejših dejavnikov v telekomunikacijah. S tem, da slabljenje kanalov v veliki večini določa maksimalno prenosno pot in, da je izguba podatkov med prenosom manjša kot pri ostalih prenosnih medijih. Na slabljenje signala v optičnem vlaknu vpliva kar nekaj dejavnikov. Ti dejavniki so odvisni od strukture valovoda, materiala izdelave, njegove čistosti in tudi postopka izdelave [2]. Slabljenje lahko kategoriziramo v številna pomembna področja, kot so absorpcija materiala, sipanje materiala, slabljenje zaradi krivin vlakna, slabljenje zaradi spojev, ipd. Spodnja slika 6 prikazuje različne dejavnike, ki jih uvrščamo pod slabljenje optičnega vlakna.



Slika 6: Slabljenje v optičnem vlaknu

Več o sipanju svetlobe in različnih tipih absorpcije pa bom povedal v naslednji točki.

#### 1.3.1. Rayleighjevo in Miejevo sipanje

Rayleighjevo sipanje je glavni mehanizem, kar se tiče slabljenja in deluje v oknu nizke absorpcije med ultravijolično in infrardečo absorpcijo. Nastane zaradi nehomogenosti naključne narave v majhnem merilu v primerjavi z valovno dolžino svetlobe. Te nehomogenosti prepoznamo kot nihanja lomnega količnika in nastajajo zaradi gostote in kompozicijskimi razlikami, ki so zamrznjene na steklo med zamrzovanjem. Kompozicijskim razlikam se lahko izognemo z boljšo izdelavo, ampak nihanju lomnega količnika, ki nastane zaradi zamrznjenih gostot nehomogenosti, se ne moremo [2]. Iz naslednje slike 7, ki prikazuje Rayleighjevo sipanje lahko razberemo, da se svetlobe krajših valovnih dolžin bolj sipajo, kot svetlobe večjih valovnih dolžin. V primerjavi z lomom in odbojem, kjer se svetloba odbije le v eno smer, se pri sipanju svetloba razprši v vse smeri [1].



Slika 7: Slabljenje v vlaknu narejeno iz čistega SiO2 - GeO2 stekla

V nehomogenostih lahko nastopi tudi linearno sipanje. Ta nastane zaradi nepopolne strukture valovoda, kar lahko vpliva na nepopolnosti v vlaknu, kot so nepravilnosti med jedrom in oblogo, razlike v lomnih količnikih po dolžini vlakna, razlike v premerih in mehurčkih. Tako sipanje nastaja v horizontalni smeri in ga imenujemo Miejevo sipanje. Miejevo sipanje lahko povzroča precejšnje izgube, ki so odvisne od snovi iz katere je narejeno vlakno, njegovo obliko in način izdelave. Nehomogenosti lahko zmanjšamo z odstranjevanjem nepopolnosti, s spremembo procesa izdelave, kontroliranim oplaščenjem vlakna in povečanjem usmerjanja vlakna z večanjem lomnega parametra.

## 2. Izdelava optičnih vlaken

V prejšnjem poglavju sem na kratko opisal vsakdanje pojme s katerimi se srečujemo, ko govorimo o optičnih vlaknih. V tem poglavju bom pa natančneje opisal postopek izdelave steklenih surovcev, iz katerih se kasneje vlečejo optična vlakna. V točkah, ki sledijo, bom predstavil postopek izdelave, različne procese in postopek vlečenja optičnih vlaken.

#### 2.1. Postopek izdelave surovcev

Za izdelavo surovcev je potrebno imeti svoj depozicijski ali odlagalni sistem z napredno programsko opremo, ki deluje kot upravljalni sistem celotnega procesa, kar prikazuje slika 8. Ta sistem mora vsebovati tudi plinske kabinete, čistilne sisteme in steklopihaško stružnico, kjer se izvaja izdelava surovcev.



Slika 8: Slikovni prikaz MCVD sistema za izdelavo surovca

Surovce za vlečenje optičnih vlaken lahko izdelujemo na več načinov. Vsi ti načini pa izhajajo iz enega osnovnega procesa, ki se imenuje MCVD (angl. Modified Chemical Vapor Deposition). To je proces, ki vsebuje depozicijo ali odlaganje izparjenih surovih materialov v že narejeno stekleno cev, izdelano iz zelo čistega stekla. Kot sem omenil, se ta proces izvaja na steklopihaški stružnici, ki jo prikazuje slika 9. Stružnica vsebuje držalo na katero vpnemo tri tipe cevi. To so vhodna cev, substratna cev in izhodna cev. Vhodna cev služi temu, da skozi njo pošiljamo vse pline, ki bodo prisotni pri procesu. Substratna cev je cev, v katero odlagamo pline in na koncu imamo še izhodno cev, ki pošilja odpadni material iz substratne cevi v čistilni sistem. Med procesom se te cevi vrtijo s hitrostjo 30 obratov na minuto in s tem omogočimo enakomeren nanos snovi po cevi.



Slika 9: Steklopihaška stružnica

Postopek izdelave surovca poteka v več slojih ali pasažah. Najprej je potrebno narediti vsaj 2 pasaži segrevanja cevi, kjer moramo doseči temperaturo med 1800 in 2000 °C. Segrevanje cevi opravimo z gorilnikom ali pečjo, ki sta prikazana na zgornji sliki. Nato je potrebno s pomočjo kisika, silicijevega klorida in fosforja ustvariti oblogo, ki obsega tri pasaže. Kot sem omenil pri poglavju osnove o optičnih vlaknih, mora imeti obloga manjši lomni količnik kakor jedro. Ravno za to poskrbi fosfor, ki se striktno uporablja za ta namen. Ko se pasaže obloge končajo, lahko preidemo v pasaže odlaganja ali depozicije. Število pasaž odlaganja je odvisno od tega, kako debelo jedro želimo narediti in ali bo končno vlakno enorodovno ali mnogorodovno. Več o enorodovnih in mnogorodovnih vlaknih bom spregovoril v kasnejših poglavjih. V podjetju Optacore, kjer se

ukvarjajo z izdelavo specialnih optičnih vlaken, ki se uporabljajo za vlakenske laserje in optične ojačevalnike, v večini izdelujejo enorodovna vlakna. Ta potrebujejo manj pasaž odlaganja kot mnogorodovna. Običajno se izdelujejo surovci vse od 6 pa do 40 pasaž odlaganja. Pri klasičnem procesu MCVD, odlaganje vsebuje reakcijo med silicijevim kloridom, ki prihaja iz plinskega kabineta in kisikom. Ta snov, se zaradi termoforeze začne odlagati na notranji strani cevi. Po koncu odlaganja snovi na stene substratne cevi je potrebno to cev še stisniti v stekleno palico. Temu postopku rečemo kolaps (angl. Collapse). Pri kolapsu je potrebno cev segreti na vsaj 2200 °C. Kolaps poteka tako, da se s pomočjo visoke temperature in nizkega tlaka v cevi ustvari površinska napetost. Ta proces povzroči izhajanje vseh plinov, ki so ostali v cevi in tako nastane steklena palica ali surovec (angl. Preform). Običajno je potrebno opraviti 3 do 5 pasaž kolapsa, da lahko cev v celoti zapremo. Med tem je treba biti pozoren na tlak v cevi, saj če preveč naraste, lahko cev prekmalu zapre in tako surovec uničimo. Po koncu kolapsa opravimo še poliranje površine surovca, da se znebimo čim več umazanij, ki so nastale med procesom.

#### 2.2. Vlečenje vlakna iz surovcev

Po izdelavi surovca, surovec vlečemo na vlečnem stolpu v vlakno. Prvi korak je, da surovec opredelimo na dve območji. Prvo območje vključuje segrevanje približno 10 cm surovca na 2200 °C v krožno-prevodni peči, da lahko iz njega naredimo t.i. staljeno območje. Ostalemu delu surovca, nad to točko rečemo nestaljeno območje, ki je segreto na 2000 °C. S tem dosežemo, da je nižji del staljenega območja v področju indukcijskega grelca in zgornji del nestaljenega območja v standardni peči. Tako ohranimo visoko temperaturo, da indukcijskemu grelcu ni potrebno segreti celotnega surovca na mejo tališča [4]. Kremenčevo steklo se s segrevanjem stali in steče v obliki solze proti tlom. Ta se potegne v tanjše vlakno. Končni premer izvlečenega vlakna je odvisen od hitrosti vlečenja, hitrosti podajanja surovca v peč in temperature v vroči coni. Premer vlakna se meri v mikrometrih (µm). Vlakno se s pomočjo motorja navije na kolut. To vlakno je zelo krhko in občutljivo. Poškodbe steklene površine lahko povzročijo pretrg, zato ga je potrebno zaščititi. Vlakno zaščitimo s plastjo, izdelano na osnovi silikona ali akrilatih materialov. To poteka v infrardeči peči ali ultravijolični peči [1]. Slika 10 prikazuje vlečenje optičnega vlakna iz surovca na kolut.



Slika 10: Slikovni prikaz vlečenja optičnega vlakna iz steklenega surovca

#### 2.3. Ostali postopki izdelave

Poleg klasičnega procesa MCVD poznamo še ostale. To so na primer, proces OCVD (angl. Outside Chemical Vapor Deposition) katerega prednost je, da lahko izdelujemo daljše surovce in s tem vlečemo daljša vlakna. Za ta postopek je značilno, da nanašamo oblogo surovca na zunanji strani cevi. Poznamo še proces VAD (angl. Vapor Axial Deposition), pri čemer gre za nanašanje hlapov iz osi. Za oba postopka je značilno, da moramo imeti celotno delovno okolje zelo čisto [1]. Eden od bolj uporabljenih procesov, s katerim se ukvarjajo tudi v podjetju Optacore, se imenuje CDS (angl. Chelate Delivery System). Ta proces je zelo podoben procesu MCVD. Razlikujeta se le v tem, da pri procesu CDS skozi vstavitveno cev v substratno cev pošiljamo ione redkih zemelj, kot so iterbij (Yb), cerij (Ce), holmij (Ho), erbij (Er) ipd., pri procesu MCVD pa skozi procesno cevko pošiljamo samo snovi kot sta silicijev klorid (SiCl<sub>4</sub>) in germanijev klorid (GeCl<sub>4</sub>). Surovce dopiramo z ioni redkih zemelj, ker imajo ti elementi vrh na takih valovnih dolžinah, ki ustrezajo izdelavi optičnih vlaken.

## 3. Vpliv lomnih likov na širjenje svetlobe v vlaknu

V svetu optičnih vlaken poznamo dva tipa vlaken. To so enorodovna in mnogorodovna vlakna. Enorodovna vlakna so pomembna za komunikacije, kjer je potrebna zelo velika pasovna širina. Enorodovno vlakno, kot prikazuje ime, lahko teoretično sprejema samo en rod. Po mnogorodovnih vlaknih pa se lahko prenaša po več tisoč rodov. Glavni razlog za izdelavo mnogorodovnih vlaken je bil, da jih je lažje spajati. Danes se v večini uporabljajo v računalniških omrežjih. V tem poglavju bom podrobneje razložil vpliv oblike lomnih likov pri mnogorodovnih in enorodovnih vlaknih in širjenje svetlobe po vlaknih.

#### 3.1. Stopničasti lomni lik

Vlakno stopničastega lomnega lika ima numerično aparturo, ki se po prerezu jedra ne spreminja [1]. Profil lomnega količnika n(x) v jedru je lahko konstanten ali gradienten in lahko domnevamo, da je konstanten tudi v oblogi  $n_{cl}$ . Pomembno je, da je lomni količnik jedra večji, od lomnega količnika obloge, da ima lahko valovod značilnosti vođenja. Lahko tudi domnevamo, da se profil ne spreminja po z osi tako da je valovod krožno-simetričen [6]. Slika 11 prikazuje obliko stopničastega lomnega lika.



Slika 11: Stopničasti profil vlakna

Optična vlakna lahko podpirajo veliko število vodenih valov, ki jih imenujemo rodovi. Celotno število rodov, ki jih lahko optično vlakno prenese je odvisna od parametra V, ki ga definiramo kot:

$$V = n_{co} k \rho \sqrt{2\Delta}$$
(3.1)

Kjer je k valovno število in ga lahko zapišemo kot k =  $2\pi/\lambda$ . Pri tem je  $\lambda$  valovna dolžina in  $\rho$  polmer jedra. Nazadnje smo definirali še lomni parameter  $\Delta$ , ki predstavlja razliko med lomnim količnikom in vrednostjo v oblogi n<sub>cl</sub>.

$$\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \quad \text{ali} \quad \Delta \approx \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{co}} \quad \text{kjer velja} \quad \Delta \ll 1$$
(3.2)

Za stopničasti lomni lik je število rodov enako [6]:

$$N = \frac{1}{2}V^2 \tag{3.3}$$

Lomni količnik stopničastega planarnega svetlovoda definiramo z:

$$n(x) = n_{co}, -\rho < x < \rho; \ n(x) = n_{cl}, |x| > \rho$$
(3.4)

Kjer sta  $n_{co}$  in  $n_{cl}$  konstanti in velja  $n_{co} > n_{cl}$ . S tem lahko pokažemo kako strukturiramo potovanje žarkov v jedru z uporabo sledenja žarkov in Snellovih zakonov. Eden najpomembnejših problemov je, da določimo potrebne pogoje, kjer se bodo žarki širili preko neabsorbiranega valovoda brez izgube moči.

Širjenje znotraj konstantnega jedra stopničastega lomnega lika valovoda je vzdolž ravnih linij. Če žarek prihaja iz točke P v enem vmesniku in naredi kot  $\theta_z z$  valovodno osjo, se bo ta žarek srečal s točko Q na nasprotnem vmesniku. To prikazuje tudi slika 12.



Slika 12: Potovanje žarka v vlaknu s stopničastim profilom

Situacija pri točki Q je enaka kot ta pri meji med dvema polovičnima prostoroma lomnih količnikov  $n_{co}$  in  $n_{cl}$ , kot prikazuje slika 13. Odboj v tej situaciji opisuje Snellov zakon. Ti zakoni so ponazorjeni s koti, povezani z normalo QN, ampak mi se raje držimo komplementarnega kota  $\theta_z$ .



Slika 13: Način odboja žarka pri stopničastem profilu

Prva slika prikazuje odboj žarka, ki odhaja iz vmesnika z istim odbojnim kotom  $\theta_z$ , druga slika pa prikazuje, da se žarek razcepi na del, ki se odbije s kotom  $\theta_z$  in drugi del, ki se odbije s kotom  $\theta_t$  v oblogo, kar podpira Snellov zakon:

$$n_{co}\cos\theta_{z} = n_{cl}\cos\theta_{t}$$
(3.5)

Žarek se odbija iz vmesnika nazaj v jedro pod kotom  $\theta_z$  ne glede na to, ali se zgodi popolni odboj ali ne. V primeru ponovitve procesa uspešnega odboja, se naredi t.i. zig-zag pot ali tirnica. V spodnji sliki pri poti (a) doseže žarek popolni odboj. Temu žarku rečemo omejen žarek, saj je popolnoma omejen v jedru. Pot (b) pa prikazuje žarek, ki se delno odbije pri vsakem odboju. Ta žarek imenujemo lomni žarek. Žarke kategoriziramo z vrednostjo  $\theta_z$  glede na:

Omejeni žarki: 
$$0 \le \theta_z < \theta_c$$
 (3.6)

Lomni žarki: 
$$\theta_c \le \theta_z \le \frac{\pi}{2}$$
 (3.7)



Slika 14: Potovanje žarka, ki se popolno odbije in delno odbije

Glede na to, da je moč omejenega žarka v popolnosti odbita nazaj v vsakem odboju, se lahko žarek širi brez kakršne koli izgube moči. Lomni žarki zgubijo delež svoje moči ob vsakem odboju, kar pomeni, da se s širjenjem slabijo.

Periodična oblika poti žarka, v prejšnji sliki, je vzrok translacijske nespremenljivosti valovoda in povzroči višanje nespremenljivosti žarka  $\beta$ , ki je konstantna po poti in navaja smer žarkov v kateremkoli položaju površine. Nespremenljivost si razlagamo kot:

$$\beta = n_{co} \cos\theta_z = n_{cl} \cos\theta_t \tag{3.8}$$

Predstava nespremenljivosti žarkov uporabljamo kot poenostavljanje opisa poti žarkov pri gradientnem profilu. Nespremenljivost žarkov in smer širjenja sta med seboj povezana tako, da lahko omogočata razvrščanje žarkov glede na njihovo vrednost β.

Omejeni žarki: 
$$n_{cl} \le \beta < n_{co}$$
 (3.9)

Lomni žarki: 
$$0 \le \beta \le n_{cl}$$
 (3.10)

20

Pomembno je, da predstavimo parametre, ki označujejo širjenje žarkov, kot so ti naslednji parametri. Tirnico žarkov lahko enostavno določimo, takoj ko pridobimo vrednost  $\theta_z$ . Določiti moramo dolžino poti L<sub>p</sub> (angl. Path length) med uspešnimi odboji in razdaljo med točkama P in Q kar prikazuje slika 15. To je uporabno pri problemih absorpcije:

$$L_{p} = \frac{2\rho}{\sin\theta_{z}} = \frac{2\rho n_{co}}{\sqrt{n_{co}^{2} - \beta^{2}}}$$
(3.11)



Slika 15: Dolžina poti Lp in polperioda žarka Zp

Za čas prehoda žarkov, potrebujemo dolžino optične poti  $L_o$  (angl. Optical path length). V homogenem mediju, ki je podan kot produkt dolžine poti in lomnega količnika:

$$L_{o} = n_{co}L_{p} = \frac{2\rho n_{co}}{\sin\theta_{z}} = \frac{2\rho n_{co}^{2}}{\sqrt{n_{co}^{2} - \beta^{2}}}$$
(3.12)

Količina, ki bo pogosto prikazana pri problemu slabljenja je pol-perioda žarka z<sub>p</sub> (angl. Ray half-way period). To je razdalja med uspešnimi odboji, merjena po valovodni osi:

$$z_{p} = \frac{2\rho}{\tan\theta_{z}} = L_{p}\cos\theta_{z} = \frac{2\rho\beta}{\sqrt{n_{co}^{2} - \beta^{2}}}$$
(3.13)

Vse je povezano s številom odbojev M (angl. Number of reflections) na enoto dolžine valovoda, ki je obratna vrednost pol-periode žarka:

$$M = \frac{1}{z_p} = \frac{\tan\theta_z}{2\rho}$$
(3.14)

Čas potovanja žarkov je najpomembnejša količina za opis razširjanja impulzov t (angl. Ray transit time). To je čas, ki ga potrebuje žarek za širjenje dolžine z po valovodu, čemur sledi cik-cak oblika poti žarka. Hitrost svetlobe izračunamo iz enačbe (1.1), in sicer:

$$c = \frac{c_0}{n_{co}} \tag{3.15}$$

Kjer je c svetlobna hitrost in  $n_{co}$  lomni količnik jedra. Velja, da večji kot je  $\theta_z$ , večji je čas potovanja [6], [7]. Čas potovanja iz prejšnjih enačb zapišemo tako:

$$t = \frac{z}{z_p} \frac{L_p}{v_g} = \frac{z}{z_p} \frac{L_o}{c} = \frac{z}{c} \frac{n_{co}^2}{\beta} = \frac{z}{c} \frac{n_{co}}{\cos\theta_z}$$
(3.16)

#### 3.2. Gradientni lomni lik

Material z gradientnim lomnim likov ima lomni količnik, ki se spreminja v različnih točkah glede na funkcijo n(r). Te materiale izdelujemo tako, da čistemu kremenčevemu steklu dodajamo nečistoče opisane v poglavju izdelava optičnih vlaken. V mediju z gradientnim lomnim likom žarki potujejo po ukrivljenih tirnicah namesto po ravni liniji. S pravo izbiro vrednosti n(r) imajo lahko enak efekt na svetlobne žarke kot konvencionalne optične komponente, kot sta npr. prizma ali leča [7]. Slika 16 prikazuje obliko gradientnega lomnega lika.



Slika 16: Gradientni profil vlakna

Ko je lomni količnik profila gradienten, določimo tirnico žarka s potjo žarka. To prikazujeta naslednja enačba in slika 17.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{ds}} \left\{ \mathbf{n}(\mathbf{r}) \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{ds}} \right\} = \nabla \mathbf{n}(\mathbf{r}) \tag{3.17}$$

Tu je s razdalja po dolžini žarka in r pozicijski vektor točke na poti žarka. To enačbo lahko upoštevamo kot generalizacijo Snellovega zakona in jo lahko odvajamo z različnimi metodami. Gradientni profil lahko upoštevamo kot limito veliko tanjših konstantnih slojev. Ko je lomni količnik konstanten velja  $\nabla n = 0$  in so tirnice žarkov ravne linije. V nasprotnem primeru izraz  $\nabla n$  štejemo kot krivuljo potovanja žarka v osi z  $\nabla n$ .



Slika 17: Prikaz poti žarka s spremenljivim lomnim količnikom

V planarnem svetlovodu, je lomni količnik n(x) odvisen samo od x osi, tako je vsaka pozicija (x, z) v poti žarka določena z dvema sestavnima deloma enačbe v x in z smeri:

$$\frac{d}{ds}\left\{n(x)\frac{dx}{ds}\right\} = \frac{dn(x)}{dx}$$
(3.18)

$$\frac{d}{ds}\left\{n(r)\frac{dz}{ds}\right\} = 0 \tag{3.19}$$

Zaradi olajšave fizične interpretacije teh enačb, je potrebno definirati kot  $\theta_z(x)$ , ki je definiran s kotom med tangento proti poti in z osi.

$$\frac{dx}{ds} = \sin\theta_z(x) \tag{3.20}$$

$$\frac{dz}{ds} = \cos\theta_z(x) \tag{3.21}$$

Druga enačba:

$$n(x)\cos\theta_z(x) = n(0)\cos\theta_z(0) \tag{3.22}$$

Druga enačba velja za vse vrednosti x. To je posploševanje Snellovega zakona za gradientni medij.

V primeru, da je lomni lik simetričen, kjer velja n(-x) = n(x) lahko naredimo tirnico žarkov po valovodu. Ta tirnica bo imela obliko sinusa in njena pot ne bo nikoli prišla do vmesnika, kar pomeni, da se ne bo izgubilo nič moči in to predstavlja omejeni žarek. Žarek, ki bo dosegel vmesnik bo izgubljen in ga imenujemo lomni žarek, kot sem to omenil že pri stopničastem lomnem liku. Slika 18 prikazuje žarek, ki doseže prelomnico in ne doseže meje, ter žarek, ki doseže mejo in se tam lomi.

Omejeni žarki: 
$$0 \le \theta_z(0) < \theta_c(0)$$
  
Lomni žarki:  $\theta_c(0) \le \theta_z(0) < \frac{\pi}{2}$ 



Slika 18: Omejeni in lomni žarek pri gradientnem lomnem liku Spodnja slika pa prikazuje t.i. sinusoidno pot, ki jo naredi omejen žarek.



Slika 19: Žarek, ki v gradientnem lomnem liku opravi poti v obliki sinusoida

Koncept širjenja žarkov  $\beta$  sem že omenil pri stopničastem lomnem liku. Pri gradientnem smo videli po prejšnjih slikah, da je pot žarka drugačna in seveda veljajo tudi druge enačbe in pravila. Sedaj za gradientni lomni lik velja naslednja enačba za širjenje žarkov z uporabo enačb 1 in 2:

$$\vec{\beta} = n(x)\cos\theta_z(x) = n(x)\frac{dz}{ds}$$
 (3.23)

Potrebno je vedeti, da je  $\overline{\beta}$  konstanten po tirnici in tudi določa smer žarka v katerikoli točki na tej tirnici ter točko prelomnice  $x_{tp}$  (angl. Turning point). Za prelomnico velja da je  $\theta_z(x) = 0$ , kar pomeni, da bo veljalo:

$$n(x_{tp}) = \overline{\beta} \tag{3.24}$$

Zdaj lahko določimo pogoje parametra širjenja žarkov za omejene in lomne žarke:

Omejeni žarki: 
$$n_{cl} < \vec{\beta} \le n_{cc}$$
  
Lomni žarki:  $0 \le \vec{\beta} \le n_{cl}$ 

Tu velja, da je  $n_{co}$  maksimalna vrednost parametra n(x).

Kot je bilo omenjeno pri stopničastem profilu, je tudi za gradientni profil potrebno definirat različne parametre, ki so pomembni za širjenje žarkov v takem mediju. Med te parametre spadata dolžina poti  $L_p$  in polperioda žarka  $z_p$ , ki sta prikazana na spodnji sliki. Poleg teh parametrov, spodnja slika prikazuje tudi prelomnici P in Q ter omejen žarek, ki potuje med tema prelomnicama. Dolžino poti in dolžino optične poti izračunamo tako:

$$L_p = \int_P^Q ds; \qquad L_o = \int_P^Q n(x) ds,$$
 (3.25)

Kjer je s razdalja po dolžini te poti. Pol-periodo žarka pa zapišemo tako:

$$z_{p} = \vec{\beta} \int_{x_{tp}}^{x_{tp}} \frac{dx}{\sqrt{\{n^{2}(x) - \vec{\beta}\}}}$$
(3.26)

Čas potovanja žarka t za gradientni lomni lik valovodov je določena z integriranjem vzdolž poti žarka. Hitrost svetlobe se znotraj jedra spreminja zaradi odvisnosti lomnega količnika od svetlobne hitrosti. Ta čas lahko zapišemo tudi tako:

$$t = \frac{1}{c} \int n(x) ds = \frac{1}{c\vec{\beta}} \int n^2(x) dz$$
(3.27)

Iz enačbe (3.25) si lahko predpostavimo, da bo čas potovanja žarka preko polperiode enak $\frac{L_0}{c}$ , kjer je L<sub>o</sub> dolžina optične poti [6], [7]. Zato velja:

$$t = \frac{zL_0}{cz_p} \tag{3.28}$$

## 3.2.1. Numerična apartura v gradientnem lomnem liku

Žarek potuje iz zraka v vlakno po centru, kjer se ustvari kot  $\theta_0$  z osjo vlakna kot prikazuje naslednja slika.



Slika 20: Sprejemni kot pri vlaknu z gradientnim lomnim likom

Za numerično aparturo tukaj velja:

$$NA = \sin \theta_a \approx n_0 a \alpha \tag{3.29}$$

Kjer je  $\theta_a$  maksimalen kot  $\theta_0$  in velja, da je tirnica žarka omejena znotraj vlakna. To lahko sedaj primerjamo to z numerično aparturo stopničastega lomnega lika, ki izhaja iz enačbe (1.4) [7].

#### 3.2.2. Parabolični lomni lik

Stopnjevanje profila lomnega lika je zelo domiselna metoda za zmanjševanje razširjanja impulzov, ki se ustvari zaradi razlike v skupinskih hitrostih rodov mnogorodovnega vlakna. Več o disperziji in razširjanju impulzov bom razložil v naslednjem poglavju. Jedro vlakna z gradientnim lomnim likom ima spreminjajoč lomni količnik, katerega vrh je v centru in se zmanjšuje postopoma s približevanjem proti oblogi. Fazna hitrost svetlobe je minimalna v centru in se postopoma veča z razdaljo polmera.

Slika 21 prikazuje, da je jedro lomnega količnika funkcija n(r) v radialni točki r in lomni količnik obloge je  $n_{cl}$ . Najvišja vrednost n(r) je n(0) =  $n_{co}$  in najmanjša vrednost nastane, ko je polmer jedra enak r = a, n(a) =  $n_{cl}$ .



Slika 21: Geometrija in profil lomnega lika gradientnega vlakna

Žarki roda, ki se nahajajo ob osi, potujejo po najkrajši poti z najmanjšo fazno hitrostjo. Žarki roda, ki se nahajajo najbolj v centru pa "cikcakajo" pod večjim kotom in potujejo po daljši razdalji z veliko fazno hitrostjo. Posledica tega je, da nastanejo razlike v skupinskih hitrostih in pričakujemo, da so časi potovanja manjši. Slika 22 prikazuje različne parametre. Eden od teh je p, ki ima več različnih imen in oznak. Temu parametru lahko rečemo parameter stopnjevanja (angl. Steepness parameter), najdemo ga lahko tudi pod imenom eksponenta profila močnostnega zakona (angl. Exponent of the power law profile), ki je označen s q. Ta določa strmost ali naklon lomnega lika. Ta funkcija pade iz n<sub>co</sub> pri r = 0 na n<sub>cl</sub> pri r = a. Za p = 1 je značilno, da je n<sup>2</sup>(r) linearen. Za p = 2, ki mu rečemo tudi parabolični lomni lik, je značilno, da je kvadratni. Pri p  $\rightarrow \infty$  gre za stopničasti lomni lik, za katerega lahko predpostavimo, da je eden izmed različnih oblik gradientnega lomnega lika z različnim parametrom stopnjevanja [7], [15]



Slika 22: Parameter stopnjevanja pri gradientnem lomnem liku

Vlakna s paraboličnim lomnim likom so pomembna, saj je njihov profil lomnega količnika zelo podoben optimalnemu profilu, ki daje maksimalno kapaciteto prenosa informacij in ustreza mnogorodovnim vlaknom. To je razlog, da so bila ta vlakna uporabljena v začetnih optičnih komunikacijskih sistemih [14].

#### 3.2.3. Oblike lomnih likov

Kot vidimo pri sliki 22 v prejšnjem poglavju, poznamo različne oblike lomnih likov pri izdelavi optičnega vlakna. Na te oblike vplivajo različni parametri kot so uporabljen material, lomni količniki v različnih točkah vlakna, lomni parameter, ipd. Za spreminjanje lomnega količnika, surovcem dodajamo različne dopante. To so germanij (Ge), fosfor (P) in aluminij (Al), ki so trenutno najbolj uporabljeni elementi za višanje lomnega količnika stekla. Te vnašamo v kremenčevo steklo kot okside in tako nastanejo germanijev oksid (GeO<sub>2</sub>), fosforjev oksid (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) in aluminijev oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Za zmanjševanje lomnega količnika stekla uporabljamo elemente kot sta bor (B) in fluor (F), ki pa jih vnašamo med procesom oblaganja. Vrednost lomnega parametra  $\Delta$  lahko povečamo s kombinacijo obeh pristopov spreminjanja lomnega količnika. Koncentracije teh dopantov morajo biti relativno nizke, da ne uničimo čistoče stekla, s čimer bi povzročili presežek absorpcije snovi. Potrebno je tudi paziti na koeficient raztezanja snovi, saj bi prevelike razlike med koeficienti jedra in obloge lahko povzročile neželene razpoke. To je predvsem značilno za dopiranje s fosforjem [11].

Prečni spremembi lomnega količnika rečemo profil lomnega lika. Karakteristike profila lomnega lika niso pomembne le za izdelavo valovoda in določevanja števila rodov, ampak tudi za kontroliranje disperzije v vlaknu. Disperzija je pomemben parameter, ki definira hitrost signala v odvisnosti od valovne dolžine. Profil lomnega lika mora ustrezati tudi določeni numerični aparturi, ki določa kot sprejemnega stožca za pošiljanje žarkov v vlakno. Zato mora vrednost numerične aparture biti previdno izbrana, saj mora ustrezati laserskemu izvoru in njegovim karakteristikam. V osnovi profil lomnega lika delimo na dve kategoriji, in sicer na stopničasti in gradientni profil. V nadaljevanju bom dokazal, da poznamo samo gradientni lomni lik.

## 4. Disperzija in njen vpliv na izdelavo vlaken

Disperzija je poleg slabljenja eden izmed glavnih problemov s katerimi se soočamo v optičnih komunikacijah. V tem poglavju bom disperzijo podrobneje opisal in skušal s pomočjo različnih primerov pokazati načine s katerimi jo lahko zmanjšamo ali pa celo izničimo.

Disperzija nastane tako, da ko v optično vlakno pošljemo svetlobni impulz, pride do različnih pojavov, ki povzročajo povečevanje širine impulza med potovanjem. Amplituda tega impulza se bo zaradi časovne razširitve znižala. Disperzijo zato lahko najboljše opišemo kot linearni pojav razširitve impulza. Ti impulzi se lahko razširijo toliko, da se začnejo prekrivati s sosednimi impulzi, kar povečuje možnost narobe sprejetega bita. Temu pojavu pravimo tudi intersimbolna interferenca [1].

Disperzijo razvrščamo v dve skupini, in sicer v kromatsko ali barvno disperzijo (angl. Chromatic dispersion) in nekromatsko disperzijo. Pri obeh skupinah poznamo različne vzroke za nastanek disperzije. Med kromatsko ali barvno disperzijo uvrščamo valovodno disperzijo (angl. Waveguide dispersion) in snovno disperzijo (angl. Material dispersion). Med nekromatsko disperzijo pa uvrščamo mnogorodovno (angl. Modal dispersion) in polarizacijsko disperzijo (angl. Polarization mode dispersion). Poznamo tudi disperzijo lomnega lika ali profilno disperzijo (angl. Profile dispersion), ki pa jo lahko uvrščamo med kromatsko in nekromatsko disperzijo [10]. Vse tipe disperzij, njihovo povezavo in za katere vrste vlaken velja ta tip disperzije prikazuje tudi slika 23.



Slika 23: Tipi disperzij [18]

#### 4.1. Nekromatska disperzija

O nekromatski disperziji govorimo, ko pojav razširitve impulza ni odvisen od spektralne širine svetlobnega vira. Označujemo jo kot  $\Delta \tau$ , ki naznanja vrednost razširitve impulza v nanosekundah v kilometrskem vlaknu oz. ns/km.

#### 4.1.1. Mnogorodovna disperzija

V digitalnih komunikacijskih sistemih informacije kodiramo in pošiljamo v obliki impulzov. Ti svetlobni impulzi se prenašajo iz oddajnika proti sprejemniku, kjer se ta informacija dekodira. Večje število impulzov, ki ga sprejemnik lahko razreši, večja je prenosna kapaciteta sistema. Svetlobni impulz, ki je poslan v vlakno se čez čas razširi med širjenjem svetlobe po vlaknu. To nastane zaradi napak kot so, ukrivljanje vlakna in razlike v lomnem količniku ter vse ostalo kar ne spada pod idealne rodove – IM (angl. Ideal modes) [16]. Temu pojavu rečemo mnogorodovna disperzija in ga prikazuje slika 24.



Slika 24: Razširitev impulzov pri mnogorodovni disperziji

Potrebno je omeniti, da tudi, če lahko dva impulza razločimo na vhodu še ne pomeni, da jih bomo lahko zaradi razširjenja razločili pri izhodu. Če na izhodu ne moremo ločiti impulzov pomeni, da obstaja možnost, da ne bomo iz teh impulzov pridobili informacije. Zato manjša kot je mnogorodovna disperzija, večja bo kapaciteta prenosa informacij sistema.

#### 4.1.1.1. Disperzija pri stopničastem profilu

Za lažje razumevanje in izračun bodo naslednje enačbe vsebovale postopek računanja disperzije v stopničastem lomnem liku. Temu primerno bom na koncu podal tudi primer.

Disperzijo v stopničastem lomnem liku lahko izračunamo tako:

$$t = \frac{AC + CB}{\frac{c}{n_{co}}} = \frac{n_{co}(AB)}{c\cos\theta}$$
(4.1)

Kjer  $\frac{c}{n_{co}}$  predstavlja širjenje svetlobe po mediju z določenim lomnim količnikom jedra, AB je razdalja, ki jo žarek v času t prepotuje in kot  $\theta$ , ki predstavlja kot odboja žarka med jedrom in oblogo. Ker se bo pot potovanja žarka ponovila, bo čas v katerem bo žarek prepotoval celotno vlakno enak:

$$t = n_{co} \frac{L}{c \cos \theta}$$
(4.2)

Zgornja enačba prikazuje da je čas, ki ga potrebuje žarek funkcija kota  $\theta$  pod katerim se žarek odbije z z-osjo, ki vodi k mnogorodovni disperziji. Če

domnevamo, da so prisotni vsi koti med 0 in  $\theta_c$ , bo čas potovanja žarka med temi odboji opredeljen na:

$$t_{max} = n_{co} \frac{L}{c}, \qquad t_{min} = L \frac{n_{co}^2}{cn_{cl}}$$
(4.3)

Če bi vhodne žarke vzbujali istočasno, bi čas prihoda na izhod teh žarkov bil enak:

$$\Delta \tau = t_{max} - t_{min} = \frac{n_{co}L}{c} \left( \frac{n_{co}}{n_{cl}} - 1 \right)$$
(4.4)

Za tipično vlakno z lomnim količnikoma med 1,45 in 1,47 lahko domnevamo, da pri vrednosti lomnega parametra 0.013 in dolžine vlakna 1 km velja, da je disperzija enaka:

$$\Delta \tau = 66.7 \times 10^{-9} \frac{s}{km} = 67 \frac{ns}{km}$$
(4.5)

To prikazuje tudi slika 25 z izjemo, da je parameter stopnjevanja tu označen s q namesto s p kot sem ta parameter opisal v prejšnjem poglavju . V primeru, da imamo sistem s hitrostjo 1 Mbit/s, kjer imamo impulz na vsako 1 µs bo disperzija s 67 ns/km potrebovala ponavljalnike na vsake 3-4 km. Če imamo sistem s hitrostjo 1 Gbit/s, kjer imamo impulz na vsako 1 ns, bo disperzija 67 ns/km povzročila neznosno razširjenje, ki bi tudi pri kratkih razdaljah bila zelo neučinkovita in ekonomično potratna [8] in [9].



Slika 25: Disperzija pri stopničastem profilu v odvisnosti od lomnega količnika

#### 4.1.1.2. Disperzija pri paraboličnem profilu

Pri vlaknu s paraboličnim lomnim likom se žarek odbije pod večjim kotom in ne glede na to, da opravi daljšo pot, pripotuje do konca vlakna hitreje, ko doleti območje manjšega lomnega količnika. To pa zato, ker manjši kot je lomni količnik, bolj se hitrost žarka bliža svetlobni hitrosti. Zaradi tega pojava žarki, ki potujejo pod različnimi koti, pridejo do konca vlakna istočasno kar pomeni da bo mnogorodovna disperzija zelo majhna. To enačbo zapišemo tako:

Jedro: 
$$n^{2}(r) = n_{co}^{2} \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^{p} \right] \quad 0 < r < a$$
 (4.6)

Obloga: 
$$n^{2}(r) = n_{cl}^{2} = n_{co}^{2}[1 - 2\Delta]$$
  $r > a$  (4.7)

Kjer  $n_{co}$  prikazuje lomni količnik jedra na osi pri r=0 in  $n_{cl}$  prikazuje lomni količnik obloge pri stopnjevalnem parametru p = 2, ki je značilna za parabolični lomni lik.

Širjenje žarka v gradientnem lomnem liku označujemo kot  $\hat{\beta}$ , ki je pa definiramo tako:

$$\tilde{\beta} = n(r) = \cos \theta(r)$$
 (4.8)

Kjer  $\theta(r)$  predstavlja kot pod katerim se žarek odbije z z-osjo. Vrednost  $\tilde{\beta}$  se nahaja med lomnima količnikoma jedra in obloge:

$$n_{cl} < \tilde{eta} < n_{co}$$

Iz tega lahko sklepamo, da vrednost  $\tilde{\beta} = n_{co}$  ustreza žarku, ki potuje po z-osi in vrednost  $\tilde{\beta} = n_{cl}$  ustreza žarku, ki se odbije pri maksimalnem dovoljenem kotu ( $\theta_c$ ). Disperzijo žarka pa izračunamo tako:

$$\Delta \tau = t_{\rm max} - t_{\rm min} \tag{4.9}$$

V tem primeru je:

$$\tau(\tilde{\beta}) = \left[\tilde{\beta} + \frac{n_{co}^2}{\tilde{\beta}}\right] \frac{L}{2c}$$
(4.10)

zato bosta minimalni in maksimalni čas enaka:

$$\tau_{\min} = \tau \left( \tilde{\beta} = n_{co} \right) = n_{co} \frac{L}{c}$$
(4.11)

$$\tau_{\text{max}} = \tau \left( \tilde{\beta} = n_{\text{cl}} \right) = \left( n_{\text{cl}} + \frac{n_{\text{co}}^2}{n_{\text{cl}}} \right) \frac{L}{2c}$$
(4.12)

Kar pomeni, da bo razširitev impulza enaka:

$$\Delta \tau = \left(\frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{co}}\right)^2 \frac{n_{cl}L}{2c} = 0.46 \frac{ns}{km}$$
(4.13)

Pri vrednosti lomnih količnikov 1.45 in 1.47 bo disperzija dobila vrednost 0.46 ns/km. Ta je skoraj zanemarljiva, kar se tiče mnogorodovne disperzije. To prikazuje tudi slika 26 [14].



Slika 26: Disperzija paraboličnega lomnega lika v odvisnosti od lomnega količnika [14]

#### 4.1.1.3. Disperzija pri optimalnem profilu

Pri tem primeru in sliki 27 bo disperzija dosegla maksimalno vrednosti v obeh primerih  $\tilde{\beta} = n_{co}$  in  $\tilde{\beta} = n_{cl}$ , tako predpostavimo [14]:

$$\tau_{\max} = \tau (\tilde{\beta} = n_{co}) = \tau (\tilde{\beta} = n_{cl}) = n_{co} \frac{L}{c}$$
(4.14)

$$\tau_{\min} = \tau \left( \tilde{\beta} = n_{co} \sqrt{1 - \Delta} \right) = \frac{2n_{co} \sqrt{1 - \Delta} L}{(2 - \Delta) c}$$
(4.15)

Kar pomeni, da bo disperzija približno enaka:



Slika 27: Disperzija optimalnega lomnega lika v odvisnosti od lomnega količnika
[14]

#### 4.1.1.4. Optimiziranje lomnega lika in izbira materiala

Pri izbiri profila ali lomnega lika vlakna se lahko zanašamo tudi na parameter optimalne oblike profila, ki ga označimo s  $p_0$ . Ta je odvisen od lomnega parametra in valovne dolžine  $\lambda_0$ . Na te parametre neposredno vpliva material iz katerega je vlakno narejeno in ta vpliv snovi imenujemo tudi profilna disperzija. Slika 28 prikazuje karakteristiko optimalnega profila v odvisnosti od valovne dolžine za dve kombinaciji snovi, in sicer za germanijev dioksid in silicijev dioksid (GeO<sub>2</sub> – SiO<sub>2</sub>) ter za fosforjev oksid in silicijev dioksid (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – SiO<sub>2</sub>).



Slika 28: Parameter optimalnega profila za dve kombinaciji materialov

Slika 29 pa dokazuje, da lahko povečamo spektralno območje optimalnega profila s kombinacijo snovi podanih v prejšnji sliki, in sicer s  $P_2O_5 - GeO_2 - SiO_2$  [15]. Kombinacija teh snovi znižuje odvisnost optimalnega profila od valovne dolžine. Optimalni profil, ki je konstanten pri večih valovnih dolžinah bi omogočal namestitve širokopasovnih omrežjih z vlakni gradientnega lomnega lika, ki bi delovale istočasno pri večih valovnih dolžinah ali pa na začetku pri kratkih valovnih dolžinah okoli 850 nm in bi jih kasneje premaknili na večje valovne dolžine med 1300 do 1500 nm. To premestitev, iz manjših valovnih dolžin na večje, bi lahko naredili enostavno z nadomestitvijo terminalov.



Slika 29: Parameter optimalnega profila za več materialov

#### 4.1.2. Polarizacijska disperzija

V realnosti enorodovna vlakna podpirajo dva ortogonalno-polarizirana rodova. Pri popolnem okroglem vlaknu imata ta dva rodova identični konstanti širjenja in razširjanje impulzov zaradi polarizacijske disperzije ne obstaja. V praksi je, med obema konstantama širjenja majhna razlika zaradi eliptičnosti jedra [10]. Iz tega lahko povzamemo da navadno enorodovno vlakno pravzaprav podpira dva rodova namesto enega. Prisotnost dveh rodov prispeva k razširitvi impulzov. Ta pojav imenujemo polarizacijska disperzija.

#### 4.2. Kromatska disperzija

Kromatska disperzija v vlaknih spremeni optično frekvenco. Odvisna je od spektralne širine svetlobnega vira. Omogoča lahko razširitev impulzov v svetlobnem signalu in s tem škoduje zmogljivosti sistema. Modulacija izoliranega impulza vsebuje spekter valovnih dolžin. Med potovanjem po vlaknu, komponente krajših valovnih dolžin potujejo hitreje kot komponente daljših valovnih dolžin [12]. Tako se impulz širi s potovanjem vzdolž vlakna in do takrat, ko pride do sprejemnika se lahko razširi po več bitnih period in s tem ustvarja napake. Kromatsko disperzijo merimo v enotah ps/nm km. To je količina širjenja v pikosekundah, ki bi se zgodila impulzu s pasovno širino 1 nm med širjenjem po vlaknu dolžine enega kilometra. V teoriji kromatsko disperzijo označimo s črko D.

#### 4.2.1. Snovna disperzija

Snovna disperzija je pojav, kjer se svetlobni impulz razširi glede na snov valovoda, ki pa je odvisen od valovne dolžine. Vrednost te disperzije je odvisna od spektralne širine izvora, območja širjenja optičnih frekvenc v mediju in atomska struktura ter indeks snovi, ki vplivata na širjenje svetlobe. Hitrost širjenja žarkov v mediju snovi je odvisna od svetlobne hitrosti in lomnega količnika medija. To prikazuje tudi enačba (1.1).

Sprememba hitrost nastane zaradi atomske strukture in elektromagnetnega polja, ki nastane zaradi širjenja svetlobe. Disperzijo vhodnega signala lahko zapišemo kot:

$$\tau_{\rm m} = \left(\frac{\rm L}{\rm c}\right) \lambda^2 \frac{\delta \lambda}{\lambda} \left(\frac{\rm d^2 n}{\rm d\lambda^2}\right) \tag{4.17}$$

Kjer je c svetlobna hitrost, L prepotovana dolžina žarka, n lomni količnik in  $\frac{\delta\lambda}{\lambda}$  relativna spektralna širina izvora. Naslednja slika prikazuje disperzijo različnih snovi [13].



Slika 30: Snovna disperzija različnih snovi v odvisnosti od valovne dolžine [13]

#### 4.2.2. Valovodna disperzija

Valovodna disperzija se pojavi zaradi razlik širjenja svetlobe v jedru in oblogi. To je tip disperzije, ki je zelo odvisna od sprememb valovne dolžine in sprememb položaja jedra in jo lahko definiramo kot:

$$\frac{\mathrm{d}\tau_{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}\lambda} = \left(-\frac{\mathrm{L}}{2\pi\mathrm{c}}\right)\mathrm{V}^{2}\left(\frac{\partial^{2}\beta}{\partial\mathrm{V}^{2}}\right) \tag{4.18}$$

Kjer je  $d\tau_w$  čas zakasnitve na katerega vpliva valovodna disperzija, V je frekvenčni parameter,  $\beta$  je konstanta širjenja in L je dolžina. Pri spremembi lomnega količnika lahko ugotovimo, da je sprememba v magnitudi valovodne disperzije manjša od materialne disperzije. Potrebno je tudi omeniti, da sta oba tipa disperzij med seboj različna. To ne pomeni, da ne moremo obeh omejiti in uravnovesiti tako, da delujeta v področju, ki ga imenujemo nična disperzijska valovna dolžina. To je področje, kjer lahko dosežemo maksimalen prenos podatkov po vlaknu zaradi zelo majhnih oz. ničnih izgub ali slabljenj. Eden od načinov zmanjšanja disperzije je, da pri izdelavi surovca dodamo dopante, kot sta germanij in fosfor. Če ju dodamo v pravih količinah, lahko omogočimo vlaknu, da ima manjšo disperzijo pri valovni dolžini 1310 nm.

Kromatska disperzija je glavni vzrok, ki določa pasovno širino enorodovnih vlaken. Obstaja možnost, da disperzijo v enorodovnih vlaknih lahko kontroliramo. To lahko naredimo tako, da uravnovesimo negativno snovno disperzijo proti pozitivni valovodni disperzijo. Tako lahko valovno dolžino, ki je odvisna od minimalne disperzije, spremenimo v območje od 1200 do 1600 nm kjer je absorpcija najnižja [13].

#### 4.3. Disperzijsko spremenjena vlakna

Glavni cilj pri izdelavi optimalnih optičnih vlaken je, da imajo najmanjše slabljenje in disperzijo pri obratovalni valovni dolžini. Potrebno je omeniti, da so naslednji tipi vlaken, ki lahko modificirajo vpliv disperzije značilni le za enorodovna vlakna in ne mnogorodovna. Čeprav to ne velja za mnogorodovna vlakna, je te tipe vlaken potrebno omeniti, saj daje vpogled kako se disperzije lahko znebimo ali jo zmanjšamo. Pri osnovnih enorodovnih vlaknih disperzija popolnoma izgine pri približno 1300 nm valovne dolžine, ampak najmanjše slabljenje nastopi pri 1550 nm [10]. Disperzijo v vlaknu spreminjamo tako, da manipuliramo obliko lomnega lika in geometrijo vlakna. Pod disperzijsko spremenjena vlakna uvrščamo disperzijsko premaknjena vlakna (angl. Dispersionshifted fibers), disperzijsko izravnana vlakna (angl. Dispersion-flattened fibers) in disperzijsko kompenzirana vlakna (angl. Dispersion compensating fibers). Slika 31 prikazuje značilnosti disperzije za standardno enorodovno vlakno, disperzijsko izravnano vlakno in disperzijsko premaknjeno vlakno v odvisnosti od valovne dolžine.



Slika 31: Značilnosti disperzije za različna enorodovna vlakna

#### 4.3.1. Disperzijsko premaknjena vlakna

Disperzijsko premaknjena vlakna so vlakna, ki delujejo pri valovni dolžini kjer je slabljenje najnižje in ni disperzije. To je področje, kjer je kromatska disperzija najmanjša in kot vidimo na sliki 31, se to zgodi pri približno 1500 nm valovne dolžine. Take lastnosti vlakna lahko dosežemo z zmanjšanjem premera jedra in povečanjem lomnega parametra [2]. Glede na to, da je minimalna disperzija zagotovljena v ozkem območju valovnih dolžin, so disperzijsko premaknjena vlakna najbolj uporabna pri prenosih preko enega kanala. Učinkovitost sistema je večja zaradi povečane razdalje med ponavljalniki, kar pa je eden najpomembnejših dejavnikov pri izgradnji optičnih komunikacijskih sistemov [10]. Pri izdelavi teh vlaken je lahko profil lomnega lika stopničasti ali gradientni. Spodnja slika prikazuje oblike lomnih likov, ki se uporabljajo pri izdelavi disperzijsko premaknjenih vlaknih, in sicer večjedrni trikotni profil, trikotni profil z ločenimi jedri in profil z dvojnim jedrom.



Slika 32: Izvedba oblik lomnih likov za disperzijsko premaknjena vlakna

#### 4.3.2. Disperzijsko izravnana vlakna

Disperzijsko izravnana vlakna omogočajo nizko disperzijo pri večjem območju valovnih dolžin. To območje sega od približna 1300 nm do 1600 nm valovne dolžine. Te lastnosti ponovno dosežemo z manipuliranjem oblike lomnega lika vlakna. Izravnanost disperzije se zgodi z delnim prenehanjem vpliva valovodne disperzije zaradi snovne disperzije pri valovnih dolžinah v območju obratovanja. Pri postopku WDM (angl. Wavelength division multiplexing) se uporablja več signalov z različnimi valovnimi dolžinami, ki ga prenaša samo eno vlakno, pri čemer želimo, da se ustvari optični sistem, kjer bodo vsi optični signali imeli relativno enako nizek šum [2]. Uspelo je oblikovati vlakno, kjer je disperzija manj kot 1 ps/nm.km v celotnem območju valovnih dolžin med 1310 nm do 1670 nm [10]. Slika 33 prikazuje oblike lomnih likov za disperzijsko izravnana vlakna. Ti obsegajo vlakno z dvojno, trojno in četverno oblogo.



Slika 33: Oblike lomnih likov značilnih za disperzijsko izravnana vlakna

#### 4.3.3. Kompenzacija disperzije

Za enorodovna vlakna je značilno, da zagotavljajo nič disperzije pri 1300 nm valovne dolžine. Danes ta vlakna večinoma obratujejo pri valovni dolžini 1550 nm, kjer nastopi pozitivna disperzija. Kompenzacijska vlakna delujejo tako, da to pozitivno disperzijo izničijo s svojo negativno disperzijo [10].

# 5. Mnogorodovna vlakna in implementacija pri daljših valovnih dolžinah

Optični valovodi so bili uporabni že veliko prej kot v kasnejših letih 20. stoletja. Šele po iznajdbi laserjev in diod se je pričelo razmišljati o implementaciji optičnih vlaken za komunikacijo pri visokih pasovnih širinah. Do leta 1970 so že razumeli prednosti enorodovnih vlaken, ampak ta so imela tudi določene slabosti. Eno od teh slabosti je ozko jedro, ki bi za učinkovito delovanje potrebovalo visoko-zmogljivi laser, namesto standardnih LED diod. Mnogorodovna vlakna so dosti bolj učinkovita, zanesljiva in imajo debelejše jedro, kot enorodovna vlakna. Pri mnogorodovnih vlaknih je bil problem razlike v skupinskih hitrostih rodov ali mnogorodovna disperzija. Zmogljivost enorodovnih vlaken bi še vedno bila višja, vendar nezanesljiva in tudi zelo draga, kar pomeni, da so postala tudi nepraktična za uporabo. Za implementacijo optičnih omrežij je zelo pomembno, da so učinkovita, enostavna za uporabo in predvsem poceni. To je glavni razlog za uporabo mnogorodovnih vlaken, pred enorodovnimi. Eden glavnih razlogov za uporabo in implementacijo mnogorodovnih vlaken so VCSEL laserji (angl. Vertical-cavity surface emitting lasers). V primerjavi z ostalimi laserji jih je lažje proizvajati, so cenejši in zmanjšujejo čas testiranja naprav [17].

Z večanjem prenosa podatkov se veča tudi spektralna vsebina, ki učinkuje vpliv kromatske disperzije. V tem poglavju bom predstavil nekaj načinov s katerimi bi bilo mogoče prestaviti področje delovanja mnogorodovnih vlaken na 1300 nm in 1550 nm valovne dolžine. Dokler bodo sistemi z mnogorodovnimi vlakni cenejši in učinkovitejši od enorodovnih, se bodo iskali načini za zmanjšanje učinka mnogorodovne disperzije, ki preprečuje delovanje pri daljših valovnih dolžinah.

#### 5.1. Prostorski svetlobni modulator (SLM)

Mnogorodovna vlakna (MMF) se uporabljajo pri prenosih podatkov v trenutnih lokalnih omrežjih (LAN). Ta tip vlaken pri doseganju višjih signalnih razmerij omejuje intersimbolna interferenca - ISI (angl. Intersymbol interference), ki nastaja zaradi mnogorodovne disperzije. Poleg že omenjenih idealnih rodov ali IM, poznamo tudi glavne rodove - PM (angl. Principal modes), ki se na koncu vlakna združijo v en impulz, tudi v prisotnosti spajanju rodov. Prej so odpravljanje intersimbolne interference reševali z električnim uravnavanjem, kar pa je povzročalo večanje šuma in s tem slabšanje razmerja bitnih napak – BER (angl. Bit error ratio). Zaradi tega pojava so predlagali način, ki vključuje oblikovanje prostorskega profila električnega polja na vhodu vlakna z uporabo prostorskega svetlobnega modulatorja - SLM (angl. Spatial light modulator) za vzbujanje le želenih glavnih rodov. To je dvodimenzionalno območje zrcal, ki imajo zmožnost spreminjanja faze in/ali amplitude poljubne točke električnega polja, kar lahko dosežemo brez povečanja šuma. Z različnimi eksperimenti je bilo dokazano, da to lahko opravljamo pri visokih bitnih hitrostih. V naslednjem delu bom, s pomočjo meritev in slik iz [16], na kratko opisal način kako lahko s pravilnimi nastavitvami SLM uporabljamo mnogorodovna vlakna brez vpliva ISI pri daljših valovnih dolžinah. Naslednja slika prikazuje prilagojeni prenosni sistem, ki omogoča zmanjšanje ISI z uporabo SLM.



Slika 34: Prilagojeni prenosni sistem

Ta sistem vsebuje oddajnik, mnogorodovno vlakno in sprejemnik, ki sprejema svetlobne impulze in jih dekodira. Pri oddajniku imamo enorodovno vlakno, ki s pomočjo svetlobe prenaša podatke na SLM, slikovni sistem, ki usmerja svetlobo iz SLM na mnogorodovno vlakno. Omenjeni SLM, je dvodimenzionalno območje pikslov (angl. Pixels), ki se uporablja za spreminjanje faze in/ali amplitude poljubne točke električnega polja na mnogorodovnem vlaknu v prostorskem območju. Intersimbolna interferenca na koncu je odvisna od vzbujalnega vzorca rodov na mnogorodovnem vlaknu. Cilj tega je, da poskusimo nastaviti SLM piksle tako, da optimalno oblikujemo točko svetlobnega polja na mnogorodovnem vlaknu in postopoma vzbujamo rodove na tem vlaknu. Na sprejemnem delu svetlobo iz mnogorodovnega vlakna zazna foto-detektor, ki ga dekodira dekodirnik. Zaznan signal se uporabi tudi pri ocenjevanju intersimbolne interference, ki nadzira adaptacijski algoritem, ki kontrolira SLM.

Pri simulaciji so uporabili mnogorodovno vlakno z gradientnim lomnim likom dolžine 1 km s premerom jedra 50 µm. Celoten sistem je deloval na valovni dolžini 1550 nm pri bitni hitrosti 10 Gb/s. Pri tej valovni dolžini je vlakno podpiralo 55 rodov pri vsaki polarizaciji. Uporabljeno enorodovno vlakno je bilo standardnega premera 10.4 µm in prav takega premera sta bili tudi leči, ki sta podatke preslikali na SLM in naprej v mnogorodovno vlakno. SLM je upravljal amplitudo in fazo pri območju pikslov 128 x 128, kar je pokrilo 95% moči vpadnega žarka. Ti piksli so združeni skupaj v večje kvadratne bloke. Velikost enega kvadratnega bloka je bila 16 x 16 pikslov. Večje število pikslov so v bloke združili zato, da tudi v primeru, če bi SLM imel samo funkcijo upravljanja faze, lahko pri blokih dosežemo upravljanje amplitude in faze, kar bi pomenilo uvajanje visoke prostorske frekvence faznega šuma, da bi dosegli uklon svetlobe stran od jedra vlakna. Simulacija pokaže, da je blok velikost 4 x 4 piksle dovolj za oponašanje upravljanja amplitude in faze s slikovnim sistemom, valovno dolžino in ostalimi parametri, ki uporabljajo SLM samo z fazni upravljanjem. Slika 38 prikazuje impulzni odziv sistema pred in po prilagoditvi nastavitev SLM. Pred prilagoditvijo imajo vsi bloki skupno amplitudo in nično fazo. V temu primeru ima vlakno naključno spajanje rodov. Vidimo, da po prilagoditvi višji red PM niso več vzbujani. To sledi k zmanjšanju intersimbolne interference in večje odprto oko, kar je dokazano pri očesnih diagramih pred in po prilagoditvi. Slika 35 prikazuje tudi optimalne nastavitve SLM.



Slika 35: Nastavitve SLM po prilagoditvi z naključnim spojem

Slika 36 prikazuje impulzni odziv in očesni diagram pred in po prilagoditvi z izjemo, da sistem uporablja sproženje z zamikom. Vlakno je brez spajanja rodov in žarek je sprožen v SLM z zamikom 5 µm iz centra mnogorodovnega vlakna po diagonali. Vidimo, da imajo optimalne nastavitve SLM fazo, ki se linearno spreminja po diagonali, kar je bilo pričakovano zaradi zamika.



Slika 36: Nastavitve SLM po prilagoditvi z zamikom od centra

Sliki 35 in 36 dokazujeta, da pri optimalnih nastavitvah, odboji svetlobe pri SLM nimajo skupne magnitude. Slika 37 pa prikazuje, da pri višji prostorski resoluciji in optimalnih nastavitvah, ima večino SLM blokov skupno magnitudo. To pomeni, da je razlika v zmogljivosti med faznim ter faznim in amplitudnim SLM manjša z večanjem prostorske resolucije.



Slika 37: Amplituda in faza SLM po prilagoditvi z visoko prostorsko resolucijo

Nazadnje je potrebno pogledati še efekt zadrževanja vseh rodov višjega reda tako, da lahko vzbujamo samo en PM. Lahko bi mislili, da bi bil najboljši način zmanjšanja intersimbolne interference zadrževanje vseh rodov višjega reda. Ampak naš cilj je, da je v očesnem diagramu oko bolj odprto, kar pa ni nujno, da pomeni zadrževanje vseh rodov višjega reda. Če omogočimo vzbujanje nekaterim rodom visokega reda lahko kompenziramo s tem, da imamo največjo moč v rodu najnižjega reda. To prikazuje tudi slika 38, kjer vidimo odziv impulzov optimalnih nastavitev in nastavitev z vzbujanjem samo enega PM, kjer ima SLM visoko prostorsko resolucijo. Če primerjamo oba očesna diagrama vidimo, da je eno oko zelo izrazito, ampak majhno, drugo malo manj izrazito, ampak bolj odprto.



Slika 38: Impulzni odziv pred in po prilagoditvi z vzbujanjem enega PM

Ti simulacijski rezultati dokazujejo, da je mogoče zmanjšati vpliv mnogorodovne disperzije in intersimbolne interference z uporabo SLM in določenih algoritmov. Vidimo tudi, da zadrževanje rodov visokega reda ni najboljših način pri zmanjševanju teh vplivov.

## Zaključek

Na začetku so predstavljeni osnovni pojmi in dejavniki kot, so struktura optičnega vlakna in prenašanje svetlobe po optičnem vlaknu. To so pomembni pojmi, s katerimi se vsak dan srečujemo v svetu optičnih komunikacij in jih je za lažje razumevanje kasnejših tem, bilo potrebno natančneje razložiti. Zaradi tesne povezave med širjenjem svetlobe po vlaknu in materialom s katerimi ta vlakna izdelujemo, sem v sodelovanju s podjetjem Optacore d.o.o. spoznal različne procese in postopke, ki so potrebni pri izdelavi surovcev iz katerih se vlečejo optična vlakna.

V nadaljevanju sta bila opisana glavna tipa lomnih likov, in sicer stopničasti in gradietni. Kasneje sem dokazal še, da poleg teh obstajata parabolični in optimalni lomni lik, ki se uporabljata v različne namene. Eden od teh je, da pri uporabi pravih kombinacij materialov za izdelavo vlakna lahko dosežemo minimalno disperzijo. V opisanem primeru je najpogostejša in najbolj neugodna mnogorodovna disperzija. V naslednjih poglavjih sem predstavil vse tipe disperzij in njihove vplive na optična vlakna.

Kot sem omenil, je v predstavljenem primeru mnogorodovna disperzija najbolj neugodna, saj je do sedaj onemogočala izdelavo mnogorodovnega vlakna, ki deluje pri valovnih dolžinah daljših od 1300 nm. V zadnjem poglavju sem, s pomočjo opisa simulacij, podal nekaj načinov, kako lahko zmanjšamo učinek mnogorodovne disperzije, da bodo lahko sistemi z mnogorodovnimi vlakni v prihodnosti delovali tudi pri valovnih dolžinah 1550 nm. Ta trend se bo nadaljeval le, če bodo mnogorodovna vlakna učinkovitejša in cenejša pri implementaciji kot pa enorodovna.

## Literatura in viri

- B. Batagelj, Optične komunikacije (2015). Laboratorij za sevanje in optiko Fakultete za elektrotehniko. Dosegljivo: (<u>http://lso.fe.uni-lj.si/</u>)
- [2] J. M. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, 3.Izdaja. Harlow: Pearson Education Limited, 2009
- [3] D. Bailey, E. Wright, Practical fiber optics. Oxford, England: Newnes, 2003
- [4] J. Cho, A. Martinak, P. Miska, J. Tracy, R. Vohden, Production of Optical Fibers by Modified Chemical Vapor Deposition. Material Science and Engineering at University of Michigan, April 2003
- [5] D. Marcuse, Principles of Optical Fiber Measurements. New York: Academic Press, 1981
- [6] A. W. Snyder, J. D. Love, Optical Waveguide Theory. London, New York: Chapman and Hall, 1983
- [7] B. Saleh, M. Teich, Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley & Sons, 1991
- [8] X. Zhang (1999), A Comprehensive Ray Approach for Teaching Intermodal Dispersion of a Parabolic Index Profile Fiber, IEEE Transactions on Education [Online]. 42(4), str. 271-275. Dosegljivo: IEEE, (<u>http://www.ieeexplore.ieee.org</u>)
- [9] A. Ghatak, K. Thyagarajan, Optical Electronics. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1989
- [10] T. Barake, A Generalized Analysis of Multiple-Clad Optical Fibers with Arbitrary Step-Index Profiles and Applications. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, April 1997
- [11] E. Desurvire, Wiley Survival Guide in Global Telecommunications: Signaling Principles, Protocols and Wireless Systems, University of Michigan: Wiley, 2004
- [12] I. Kaminow, T. Li, Optical Fiber Telecommunications: Systems and Impairments IV-B. San Diego, London: Academic Press, 2002

- [13] F. C. Allard, Fiber Optics Handbook: For Engineers and Scientists. University of Michigan: McGraw-Hill, 1990
- [14] A. Ghatak, A. Sharma, R. Tewari, Understanding Fiber Optics on a PC. World Scientific, 1997
- [15] A. H. Cherin, An Introduction to Optical Fibers. McGraw-Hill, 1983
- [16] R. Panicker, J. Kahn, S. Boyd (2008), Compensation of Multimode Fiber Dispersion Using Adaptive Optics via Convex Optimization. Journal of Lightwave Technology [Online]. 26(10), str. 1295-1303. Dosegljivo: (https://stanford.edu/~boyd/papers/pdf/mmf\_slm\_cvx.pdf)
- [17] K. M. Patel, Spatially Resolved Equalization: A New Concept in Intermodal Dispersion Compensation for Multimode Fiber. School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, July 2004
- [18] D. Sanchez Montero, C. Vazquez Garcia, Multimode Graded-Index Optical Fibers for Next-Generation Broadband Access. Intech, 2013