

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Vliv ohybů optických vláken na optické systémy v pásmu 1310-2000 nm

Bc. Martin Požár

Vedoucí: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Obor: Mobilní komunikace
Studijní program: Elektronika a komunikace
Srpen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Požár** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **457133**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Mobilní komunikace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv ohybů optických vláken na optické systémy v pásmu 1310-2000 nm

Název diplomové práce anglicky:

Impact of optical fiber bending on optical systems in the 1310-2000 nm range

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce bude teoretická rešerše, simulační analýza, návrh měřicí metodiky a experimentální vyhodnocení vlivu ohybu na optická vlákna a vláknové systémy v rozsahu vlnových délek 1310 – 2000 nm.

Student bude realizovat tyto činnosti:

- 1) Teoretický rozbor vlivu ohyb na optická jednovláknová vlákna.
- 2) Simulační analýza vláken G.652 (standardní) a G.657 (odolná na ohyb) v simulačním rozhraní BeamPROP (s případným rozšířením na mikrostrukturální optická vlákna).
- 3) Návrh měřicího zapojení a metodiky pro vyhodnocení vlivu ohybů.
- 4) Příprava experimentálního zapojení a realizace měření.
- 5) Porovnání měřených dat s teoretickými a simulačními předpoklady a rovněž srovnání s výrobcí definovanými hodnotami.
- 6) Realizace zjednodušeného datového přenosu při sledování vlivu ohybů na vlnové délce 1550/2000 nm na přenosové vlastnosti optického systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Saleh, B.E.A., Teich, M.C. Základy fotoniky. Matfyzpress, Praha, 1994
- [2] Hui, R., O'Sullivan, M., Fiber Optic Measurement Techniques, Elsevier Academic Press, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Matěj Komanec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Matěji Komančovi, Ph.D., za pomoc a rady při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu ve studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 14. srpna 2020

Abstrakt

Diplomová práce se podrobně zabývá vlivem ohybu na přenosové vlastnosti jednovidových optických vláken. Jsou zkoumána jednovidová optická vlákna konvenční a vlákna odolná na ohyb. Jsou provedeny jejich simulace, kde jako referenční vlákno je využito vlákno standardu G.652.D. Práce se dále podrobněji zabývá vlákny odolnými na ohyb dle standardu G.657. Pro praktické porovnání daných vláken z hlediska ohybu je navrženo měřicí pracoviště a jsou provedeny experimentální testy. Nakonec se práce zaměřuje na možné využití optických vláken standardu G.657 jako možnou náhradu za speciální optická vlákna pro přenos dat na 2000 nm. Přenos dat na vlnové délce 2000 nm je realizován pomocí bezdrátového optického spoje.

Klíčová slova: optické vlákno, jednovidové vlákno, ohybová ztráta, útlum, průměr vidového pole

Vedoucí: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Fakulta elektrotechnická,
Technická 2,
166 27 Praha 6 - Dejvice

Abstract

The master thesis aims on the detailed analyses of bending on single mode optical fiber transmission properties. Single mode conventional and bend resistant fibers are examined. Simulations are carried out with a standard fibre G.652D used as a reference fiber. The thesis also examines in detail the bend resistant fibres, according to the G.657 standard. Measuring workplace was designed to enable practical comparison of given fibers in terms of bending and numerous experimental tests were carried out. Finally the thesis focuses on the possible use of optical fibres standard G.657 as a replacement for the special optical fibres in 2000 nm data transfer. The data transfer in 2000 nm wavelength is realized by a free-space optics link.

Keywords: optical fiber, single-mode fiber, macrobending loss, attenuation, mode-field diameter

Title translation: Impact of optical fiber bending on optical systems in the 1310-2000 nm range

Obsah

1 Úvod	1	6.2 Zpracování naměřených výsledků	38
2 Ztráty vlivem ohybů	3	6.2.1 Nejistota měření	38
2.1 Kritický úhel	4	6.3 Měření ztrát makroohyby u G.652.D	39
2.2 Evanescentní vlna	5	6.4 Měření ztrát makroohyby u G.657.A2	42
2.3 Ztráty makroohyby	6	6.5 Měření ztrát makroohyby u ESM-12B	44
2.3.1 Výpočet útlumu způsobený makroohybem	7	6.6 Porovnání naměřených dat s teoretickými a simulačními podklady	45
3 Rozdělení optických vláken	11	7 Vliv ohybů na vlnové délce 1550/2000 nm na přenosové vlastnosti optického systému	51
3.0.1 Jednovidové vlákno	13	7.1 Bit Error Rate test na vlnové délce 1550 nm	51
3.1 Vlákná odolná na ohyb	13	7.2 Přenos RF signálu přes optickou infrastrukturu na vlnové délce 2000 nm	52
3.1.1 Doporučení ITU-T pro jednovidové vlákno G.652	14	7.2.1 Měření FSO	53
3.1.2 Doporučení ITU-T pro jednovidové vlákno G.657	16	8 Závěr	57
3.1.3 Porovnání vláken G.652 a G.657	18	Literatura	59
3.1.4 Mikrostrukturní optická vlákna	19	A Tabulky naměřených hodnot	63
3.1.5 Ztráty makroohyby u mikrostrukturních vláken	23	Simulace	63
4 Metody měření ztrát makroohybem optických vláken	25	Měření	64
4.1 Metoda dvou délek	26	Měření FSO	69
4.2 Metoda monitorování výkonu	27	B Grafy	71
5 Simulace	29		
5.1 Simulace vlákna G.652.D	29		
5.1.1 Ztráty makroohyby u vlákna G.652	30		
5.2 Simulace vlákna G.657	32		
5.2.1 Ztráty ohyby u vlákna G.657	32		
5.3 Porovnání simulací G.652.D a G.657.A2	34		
5.4 Simulace mikrostrukturního vlákna ESM-12B	35		
6 Měření ztrát makroohyby	37		
6.1 Návrh měřícího pracoviště	37		

Obrázky

2.1 Útlum optického vlákna [17]	4	4.2 Měření změny optického výkonu pomocí referenčního vzorku [31] . .	27
2.2 Totální odraz na rozhraní dvou prostředí	5	4.3 Měření změny optického výkonu pomocí stabilního zdroje [31]	28
2.3 Příklady vedení paprsků ve vlákne [17]	6	5.1 Vlákno G.652.D a jeho index lomu pro vlnovou délku 1310 nm	30
2.4 Typy vln [17]	6	5.2 Simulace makroohybových ztrát u vlákna G.652.D	31
2.5 Příklad vyzáření části vlny z optického vlákna [28]	7	5.3 Vlákno G.657 a jeho index lomu pro vlnovou délku 1310 nm	32
2.6 Index lomu vlákna v rovném stavu a nakloněném stavu [29]	8	5.4 Simulace makroohybových ztrát u vlákna G.657.A2	33
3.1 Rozdělení optických vláken	11	5.5 Závislost poměru výkonu a útlumu způsobený makroohybem u vláken G.652.D a G657.A2 pro určité vlnové délky	34
3.2 Normalizovaná konstanta šíření b jako funkce normalizované frekvence V pro několik vláknových režimů nízkého řádu [28]	12	5.6 Vlákno ESM-12B a jeho index lomu pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$	35
3.3 Konfigurace elektrického pole pro tři LP vidy [28]	13	6.1 Měřicí soustava pro N závitů na vlákne	37
3.4 Typy jednovidových optických vláken odolných na ohyb [9]	14	6.2 Schéma pro měření ohybu bez vidového filtru	38
3.5 MFD v jednovidovém vlákne	15	6.3 Schéma pro měření ohybu na $\lambda = 2000 \text{ nm}$	38
3.6 Posun Gaussovského svazku ve vlákne způsobený ohybem vlákna [30]	15	6.4 Schéma pro měření ohybu u vlákna ESM-12B	38
3.7 Indexy lomu vláken typu G657	17	6.5 Porovnání velikosti útlumu vlákna G.652.D na $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ a $\lambda = 2000 \text{ nm}$	41
3.8 Makroohybové ztráty pro ITU-T G657 vlákna [9]	19	6.6 Porovnání velikosti útlumu vlákna G.657.A2 na $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ a $\lambda = 2000 \text{ nm}$	43
3.9 Rozdělení mikrostrukturních vláken [13]	20	6.7 Porovnání velikosti útlumu vlákna ESM-12B na $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ a $\lambda = 2000 \text{ nm}$	45
3.10 Mechanismus šíření paprsku ve vlákne s pevným jádrem [11]	21	6.8 Porovnání vypočtených, nasimulovaných a změřených hodnot útlumu pro vlákno G.652.D	46
3.11 Mikrostrukturní optické vlákno s pevným jádrem [13]	21		
3.12 Mechanismus šíření paprsku v Braggovském optickém vlákne s dutým jádrem [11]	22		
3.13 Hollow-core PCF [13]	23		
4.1 Metoda měření dvou délek	26		

6.9 Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 1310$ nm	47
6.10 Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 1550$ nm	48
6.11 Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 2000$ nm	48
7.1 Zapojení pracoviště při měření bitové chybovosti v závislosti na ohybu vlákna, Tx - vysílací část, Rx - přijímací část	51
7.2 Zapojení pracoviště FSO	53
7.3 Konstelační diagramy 64-QAM modulace	54
7.4 Závislost EVM a SNR na poloměru ohybu vlákna v optickém systému FSO	55
B.1 Závislost poměru výkonu a útlumu způsobený makroohybem u vláken G.652.D a G.657.A2 pro určité vlnové délky	71

Tabulky

3.1 Hodnoty útlumů při ohybu pro vlákna G.652 a G.657 [7], [8]	18
5.1 Hodnoty indexů lomu pro vlákno G.652.D	30
5.2 Hodnoty indexu lomu pro vlákno G.657.A2	32
5.3 Nasimulovaný průměr vidového pole u vlákna ESM-12B	35
6.1 Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310$ nm	40
6.2 Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550$ nm	40
6.3 Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000$ nm	41
6.4 Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310$ nm	42
6.5 Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550$ nm	42
6.6 Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000$ nm	43
6.7 Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 1310$ nm	44
6.8 Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 1550$ nm	44
6.9 Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 2000$ nm	44
7.1 Naměřené hodnoty BER v závislosti na ohybu vlákna G.652.D v optickém systému	52
7.2 Výsledné EVM pro vlákno G.657.A2 v optickém systému FSO	54
7.3 Výsledné SNR pro vlákno G.657.A2 v optickém systému FSO	54
A.1 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310$ nm	63
A.2 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550$ nm	63

A.3 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$.	63
A.4 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$	64
A.5 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$	64
A.6 Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$	64
A.7 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$.	64
A.8 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$.	65
A.9 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$.	65
A.10 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$	66
A.11 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$	66
A.12 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$	67
A.13 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$	67
A.14 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$	68
A.15 Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$	68
A.16 Naměřené hodnoty SNR v závislosti na ohybu vlákna v optickém systému	69
A.17 Naměřené hodnoty EVM v závislosti na ohybu vlákna v optickém systému	69

Seznam zkratk a symbolů

Symbol

α	koeficient útlum
α_A	koeficient absorpce
α_M	koeficient rozptylu na mikroohybech
α_N	koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách
α_O	koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích
α_o	Koeficient útlumu záření
α_R	koeficient Rayleigho rozptylu
β	Konstanta šíření vidu
Δ	Rozdíl indexů lomu
Δ_x	Chyba přístroje
γ	Míra rozpadu pole v plášti
κ	Míra rozpadu pole v jádru
Λ	Rozteč jednotlivých mikrostruktur
λ	Vlnová délka
λ_c	Mezní vlnová délka
ϕ_c	Kritický úhel dopadu paprsku
ϕ	Úhel dopadu paprsku
A	Útlum
a	Poloměr jádra vlákna
a_i	Sellmeierův koeficient
b	Normalizovaná konstanta šíření
b_i	Sellmeierův koeficient

d	Průměr mikrostrukturních otvorů	LTE	Long-Term Evolution
E	Intenzita elektrického pole	MFD	Mode Field Diameter
F_0	Pole v radiálním směru pro dominantní vid	PBG	Photonic Band Gap
H	Intenzita magnetického pole	PCF	Photonic Crystal Fiber
K	Modifikovaná Besselova funkce prvního řádu	SNR	Signal to Noise Ratio
k_0	Konstanta šíření vidu ve vakuu	TDFA	Thulium-Doped Fiber Amplifier
n	Index lomu	VoIP	Voice over Internet Protocol
n_{eff}	Efektivní index lomu		
R_{cs}	Kritický poloměr ohnutí jednovidového vlákna		
R_{eff}	Efektivní poloměr ohybu		
u_A	Nejistota typu A		
u_B	Nejistota typu B		
u_C	Nejistota typu C		
V	Normalizovaný kmitočet		
Zkratka			
BER	Bit Error Rate		
BPM	Beam Propagation Method		
ESM	Endlessly Single-Mode		
EVM	Error Vector Magnitude		
FSO	Free Space Optics		
FTTx	Fiber To The x		
IEC	International Electrotechnical Commission		
IPTV	Internet Protocol Television		
ITU	International Telecommunications Union		

Kapitola 1

Úvod

Optická vlákna v současné době postupně nahrazují metalická vedení. Hlavním důvodem jsou vysoké požadavky na rychlost připojení a velký objem přenesených dat. Dnes téměř každá domácnost využívá mnoho systémů, aplikací a senzorů, které vyžadují vysokorychlostní připojení. Jedná se například o IPTV, VoIP, chytrou domácnost, Virtuální realitu, atd. Optická vlákna se v telekomunikacích využívají především díky jejich velké šířce pásma (vyšší rychlost přenosu dat), nízkému útlumu, bezpečnému přenosu a odolnosti vůči elektromagnetické interferenci a přeslechům. Hlavní nevýhodou optických vláken z hlediska instalace v malém prostoru je jejich citlivost na ohyb. Vlákna se mnohdy umísťují do malých prostorů a na vlákně se často objevují ohyby o poloměrech menších jak 30 milimetrů. Proto se vyrábí optická vlákna odolná na ohyb, která jsou instalovaná do přístupové sítě v různých variantách FTTx (FTTx - Fiber to the x). Dříve byla do těchto variant připojení využívána vlákna standardu G.652. V současnosti se při výstavbě nové FTTx sítě využívají vlákna standardu G.657, která jsou odolná na ohyb.

Cílem diplomové práce je teoretická rešerše, simulace optických vláken odolných na ohyb, návrh měřicího pracoviště a následné měření vlivů ohybu optických vláken na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 2000 nm. Nejprve je analyzováno jednovláknové optické vlákno standardu G.652.D, které slouží jako reference pro další analýzy a měření. Základem je analýza šíření optické vlny na rozhraní jádro-plášť při ohybu vlákna. Pro simulace byl využit softwarový nástroj BeamPROP. Jádro diplomové práce se zabývá optickým vláknem standardu G.657.

Měření ohybu klasického křemenného optického vlákna v oblasti 2000 nm by se mohlo zdát zbytečné, protože útlum na této vlnové délce je díky absorpčním ztrátám v řádu desítek dB/km. U běžných vlnových délek používaných v telekomunikacích mají vlákna minimální dosažitelný útlum 0.15 dB/km. Přenos dat na 2000 nm je ale výhodný ku příkladu pro bezdrátové optické spoje, které těží z nízkého útlumu atmosféry, vyšších povolených optických výkonů a menšímu vlivu rozptylu mlhy či deště. Bezdrátový optický spoj

využívá mezi zdrojem signálu a vysílačem optické vlákno. Vlákná určená specificky pro přenos signálu na vlnové délce 2000 nm jsou 10 krát dražší než běžná optická vlákna. Proto je práce zaměřena na přenos signálu ve 2000 nm s cílem zjistit, zda je možné pro tento účel použít optické vlákno odolné na ohyb místo vlákna pro 2000 nm.

Kapitola 2

Ztráty vlivem ohybů

Tato kapitola popisuje jevy související s ohybem jednovidových optických vláken a ztrátou optického signálu. Prvotně uvádí přehled všech mechanismů ztrát optických vláken a poté přistupuje k podrobnějšímu popisu ztrát způsobených makroohybem. Podrobněji rozebírá důvody vzniku ztrát makroohybem a následný výpočet těchto ztrát.

Měřítkem celkových ztrát v optickém vlnovodu je útlum. Vyjadřuje, kolik výkonu se při přenosu signálu v optickém vláknu ztratí. To znamená, že vysoce ovlivňuje přijatý výkon na konci optického spoje. Útlum optického vlákna se vyjadřuje v jednotkách dB nebo dB/km. Výsledný přijatý výkon lze vypočítat z rovnice 2.1, kde z je délka optického spoje a α je koeficient útlumu [17].

$$P \approx e^{-\alpha z} \quad (2.1)$$

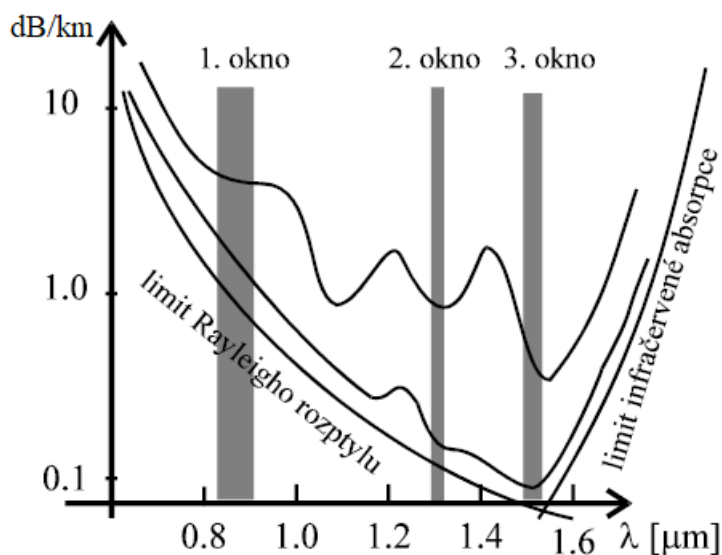
Celkový koeficient útlumu se skládá z více složek a jeho výpočet je dán sumou z níže uvedených koeficientů.

- α_R - koeficient Rayleigho rozptylu
- α_O - koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích
- α_M - koeficient rozptylu na mikroohybech
- α_A - koeficient absorpce
- α_N - koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_O + \alpha_M + \alpha_A + \alpha_N \quad (2.2)$$

Všechny tyto koeficienty jsou závislé na vlnové délce, na které je signál přenášen. Na obrázku 2.1 je zobrazený útlum křemenných vláken přes vlnové délky. Horní křivka zobrazuje útlum vláken, které byly používány v 70.letech, dolní křivka zobrazuje útlum vláken používaných v současné době. Pro přenos dat v optických vláknech byla definována 3 telekomunikační okna (oblasti

vlnových délek 850, 1310 a 1550 nm), na kterých je přenos realizován. Tato okna jsou zvýrazněna také v obrázku 2.1.



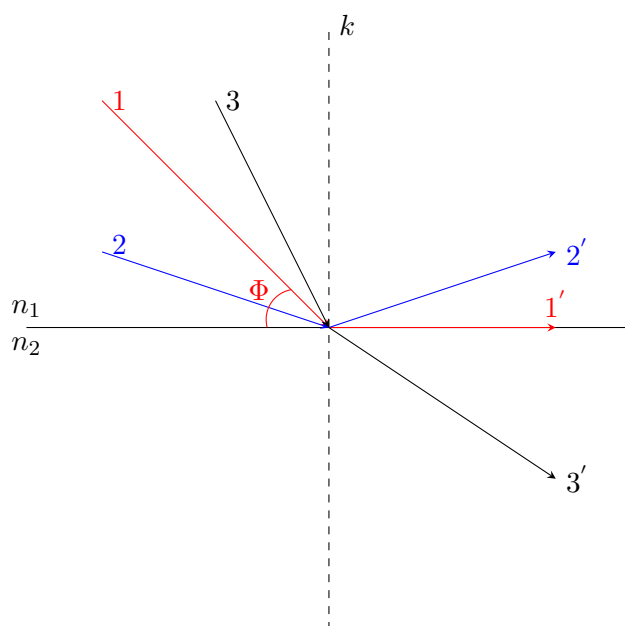
Obrázek 2.1: Útlum optického vlákna [17]

Diplomová práce se zaměřuje především na koeficient rozptylu na ohybech. Koeficient popisuje útlum způsobený makroohybem. Na tento koeficient útlumu jsou především velmi citlivá jednovidová optická vlákna. Při dosažení určitého kritického poloměru ohybu se jejich útlum rapidně zvyšuje. Velikost ztráty způsobené makroohybem je také silně závislá na vlnové délce.

Útlum způsobený makroohybem lze vysvětlit dvěma způsoby. První způsob vychází z geometrické optiky, kde se definuje tzv. kritický úhel dopadu, který splňuje podmínku pro totální odraz. Ohnutím vlákna se tento úhel zvětšuje a dochází ke vzniku útlumu. Druhý způsob, objasnění důvodu vzniku útlumu při ohybu, vychází z principu šíření vlny ve vlákně. Vlna se šíří rychleji od středu křivosti než blíže ke středu vlákna. Energie vlny se vyzáří, pokud rychlost evanescentní vlny přesáhne rychlost světla v optickém vlákně.

2.1 Kritický úhel

Paprsková optika využívá Snellova zákona. Tento zákon popisuje, jak se chová paprsek na rozhraní dvou optických prostředí. Paprsek přechází z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího nebo naopak. To znamená, že index lomu n_1 je větší než index lomu n_2 [18].



Obrázek 2.2: Totální odraz na rozhraní dvou prostředí

Úhel dopadu musí být menší nebo roven kritickému úhlu dopadu ϕ a pro indexy lomu musí platit $n_1 > n_2$, aby docházelo k totálnímu odrazu viz obrázek 2.2. Totální odraz je reprezentován paprsky 1 a 2. Úhel dopadu u paprsku 1 je roven kritickému úhlu, proto se paprsek šíří podél rozhraní. Paprsek 3 má úhel dopadu větší, láme se a proniká do druhého prostředí.

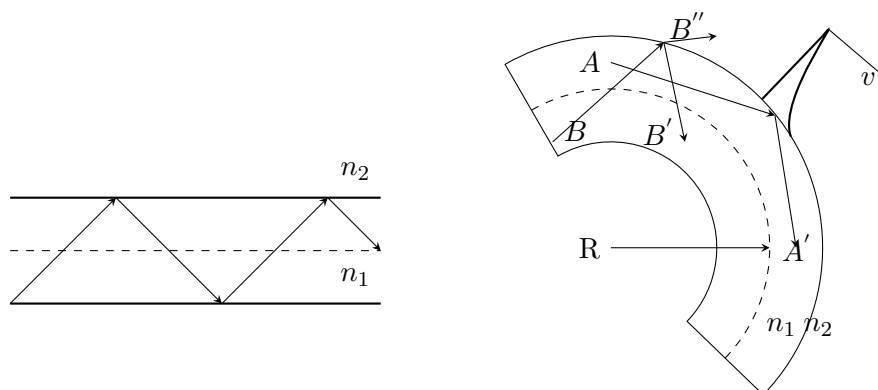
Na obrázku 2.3 lze vidět dva příklady vedení paprsků v optickém vlákně. Vedení paprsku ve vlákně bez ohybu je znázorněno na obrázku 2.3a. Paprsek je veden pomocí totálního odrazu, protože úhel dopadu paprsku je menší než úhel kritický. Obrázek 2.3b znázorňuje dva paprsky šířící se vlákem. Paprsek B má díky ohybu větší úhel dopadu než je kritický úhel. Úhel ϕ narůstá, pokud bylo vlákno ohnuto. Jestliže k totálnímu odrazu nedochází, potom $\phi > \phi_c$ a paprsek začne pronikat do pláště. Podmínku pro kritický úhel lze vidět v rovnici 2.3, kde $\sin 90^\circ = 1$.

$$\frac{\sin \phi_c}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

2.2 Evanescentní vlna

Evanescentní vlna vzniká po dopadu vlny pod úhlem menším nebo rovnému kritickému úhlu na rozhraní dvou prostředí (jádra a pláště vlákna). Doprovází vlnu vedenou, ale v praxi velmi rychle zaniká. Intenzita této vlny exponenciálně klesá se vzdáleností od rozhraní, na kterém byla vytvořena a šíří se s menší fázovou rychlostí, než jí odpovídá prostředí s indexem lomu pláště. Na obrázku 2.3b je znázorněn dopad paprsku A na rozhraní pod úhlem $\phi \leq \phi_c$ a odráží

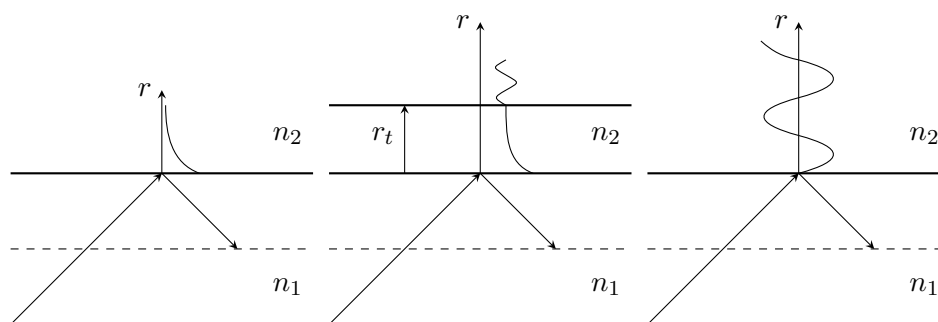
se, ale na rozhraní jádra a pláště vzniká evanescentní vlna. Energie vlny se vyzáří, protože rychlost vlny by měla přesáhnout rychlost světla.



(a) : Vedení paprsku ve vlákně (b) : Vedení paprsku ve vlákně při ohybu

Obrázek 2.3: Příklady vedení paprsků ve vlákně [17]

Úhel dopadu paprsku je tedy závislý na poloměru ohybu. Jestliže platí $\phi_c \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$, tak paprsek ztrácí část energie při odrazu a v plášti se vytváří tzv. tunelující vlna (obrázek 2.4b). Tunelující vlna má do určitého poloměru $r = r_t$ charakter vlny evanescentní (obrázek 2.4a), od poloměru $r > r_t$ má vlastnosti vlny vyzařované. Je-li $\phi_N < \frac{\pi}{2} - \phi_c$, kde ϕ_N je úhel mezi paprskem a kolmicí, vzniká vlna vyzařovaná (obrázek 2.4c) [17].



(a) : Evanescentní vlna (b) : Tunelující vlna (c) : Vyzařovaná vlna

Obrázek 2.4: Typy vln [17]

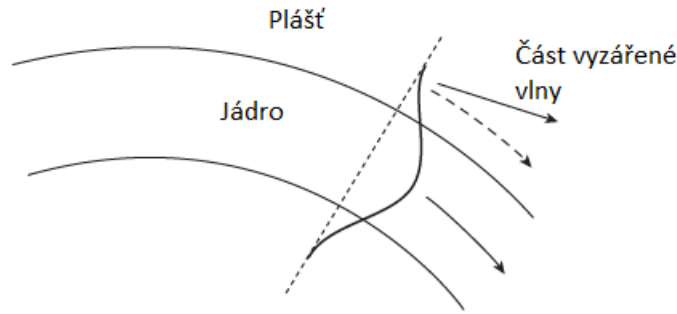
2.3 Ztráty makroohyby

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, ztráty makroohybem se zvyšují pokud poloměr ohybu vlákna překročí stanovenou kritickou hodnotu. Tato hodnota se nazývá kritický poloměr ohybu. Kritický poloměr ohybu jednojádřového

vlákna R_c může být odhadován [28]:

$$R_c \simeq \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^{\frac{3}{2}}} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^{-3} \quad (2.4)$$

kde λ_c je mezní vlnová délka pro jednovláknové vlákno. Kritická vlnová délka vyzařovaného světla se postupně zmenšuje s poloměrem ohybu [28].



Obrázek 2.5: Příklad vyzáření části vlny z optického vlákna [28]

Výsledná ztráta makroohybem je složena ze ztráty přechodem (Transition loss) a ztráty ohybem (Bend loss). Ztráty přechodem lze chápat jako plynulost přechodu. Tyto ztráty se výrazně zvyšují, pokud je přechod prudký. Charakter vyzařování svazků je významně ovlivněn touto ztrátou. Ohybové ztráty pak odpovídají jednotlivým vyzářeným paprskům. Tato ztráta se zvyšuje lineárně s poloměrem ohybu, na rozdíl od ztráty přechodem, která roste prudce. Makroohyby ovlivňují nejen přenášený výkon, ale i profil indexu lomu vlákna. Ztráty mohou být obecně představovány koeficientem útlumu záření, který má tvar [28]:

$$\alpha_o = c_1 e^{-c_2 R} \quad (2.5)$$

kde R je poloměr zakřivení ohybu vlákna a c_1 , c_2 jsou konstanty, které jsou nezávislé na poloměru.

Ztráty makroohyby mohou být redukovány pomocí:

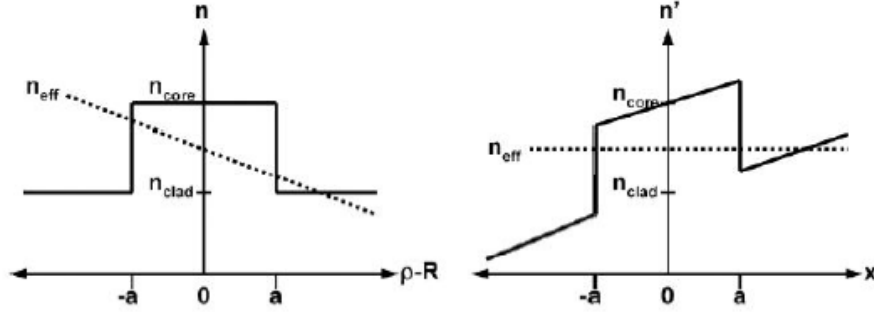
- návrhu vláken s velkými rozdíly relativního indexu lomu
- práce na nejkratší možné vlnové délce

■ 2.3.1 Výpočet útlumu způsobený makroohybem

Výpočet ztrát makroohybem je velmi složitá záležitost. Pro výpočet již bylo navrženo několik modelů.

První model představil v roce 1976 Dietrich Marcus, po němž je model pojmenován. Tento model využívá toho, že vlákno v ohnutém stavu má

podobné chování jako vlákno v přímém stavu, ale s nakloněným indexem lomu.



Obrázek 2.6: Index lomu vlákna v rovném stavu a nakloněném stavu [29]

Model nakloněného indexu lomu lze vypočítat pomocí následující rovnice

$$n' = n_{material} \cdot \left(1 + \frac{x}{R}\right), \quad (2.6)$$

kde n' je modifikovaný index lomu, R je poloměr ohybu vlákna, x je poloha ve směru ohybu a $n_{material}$ je index lomu ohnutého vlákna. Tento index lomu lze vypočítat pomocí rovnice

$$n_{material} = n \left(1 - \frac{n^2 x}{2R} (P_{12} - v(P_{11} + P_{12}))\right), \quad (2.7)$$

kde n je index lomu narovnaného vlákna, v je Poissonovo číslo a P_{11} a P_{22} jsou komponenty fotoelastického tenzoru. Použitím výše uvedených rovnic 2.6 a 2.7 je možné definovat efektivní poloměr ohybu R_{eff} , který je použit při výpočtu útlumového koeficientu v rovnici 2.9.

$$R_{eff} = \frac{R}{1 - \frac{n^2}{2} (P_{12} - v(P_{11} + P_{12}))} \quad (2.8)$$

Pro tavený oxid křemičitý je poměr $\frac{R_{eff}}{R} \approx 1.28$. Model Marcuse pracuje s vlákem, které má jádro a nekonečně rozlehlý plášť. Tento model platí pouze pro lineárně polarizované vidy. Pro koeficient makroohybových ztrát platí následující rovnice

$$2\alpha = 4.343 \frac{\pi^{\frac{1}{2}} k^2 \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R_{eff}}{3\beta_z^2}\right)}{2R_{eff}^{\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{3}{2}} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)}, \quad (2.9)$$

kde 2α je koeficient útlumu makroohybu v jednotkách dB/m, R_{eff} je efektivní poloměr ohybu vlákna, který lze vypočítat z rovnice 2.8, V je normalizovaná frekvence, K je modifikovaná Besselova funkce prvního řádu, κ a γ jsou míry rozpadu pole v jádru a plášti, které lze vypočítat z rovnic 2.10, 2.11 a β_z je konstanta šíření pro vlákno [15].

$$k = \sqrt{k_{\text{jádro}}^2 - \beta_z^2} \quad (2.10)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta_z^2 - k_{\text{plášť}}^2} \quad (2.11)$$

Další model pro výpočet makroohybových ztrát v optickém vlákně byl představen v roce 1978 pány J.Sakai a T.Kimurou. Rovnice je vhodná pro výpočet ztrát makroohybu jakéhokoliv vidu, jak dominantního, tak vyšších vidů v optických vláknech s libovolným indexem lomu. Použitím tohoto vzorce je koeficient ztráty makroohybem vyjádřen ve tvaru:

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} A_e^2}{2sP} \cdot \frac{a \exp\left(\frac{-4\Delta w^3}{3aV^2} R\right)}{w \left(\frac{wR}{a} + \frac{V^2}{2\Delta w}\right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.12)$$

Výše uvedené parametry jsou dány:

$$V = k_0 a \sqrt{N_{\text{max}}^2 - N_{\text{clad}}^2}, \quad (2.13)$$

$$w = a \sqrt{\beta^2 - (k_0 N_{\text{clad}})^2} = a \cdot \gamma, \quad (2.14)$$

$$\Delta = \frac{N_{\text{max}}^2 - N_{\text{clad}}^2}{2N_{\text{max}}^2}, \quad (2.15)$$

kde a je poloměr jádra vlákna, N_{max} je maximální hodnota indexu lomu a N_{clad} je index lomu pláště, β je konstanta šíření vidu, k_0 je konstanta šíření vidu ve vakuu, V je normalizovaná frekvence, $s = 2$ pokud řád Besselovi funkce je $v = 0$ nebo $s = 1$ pro $v \neq 0$ [27].

Poslední zde zmíněný model pro výpočet ztrát způsobené makroohybem byl formulován v [30] jako:

$$\alpha = \left(\frac{\pi V^8}{16aR_b w^3}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{4R_b \Delta w^3}{3aV^2}\right) \frac{\left[\int_{\infty}^0 (1-f) F_0 R dR\right]^2}{\int_{\infty}^0 F_0^2 R dR}, \quad (2.16)$$

kde F_0 je pole v radiálním směru pro dominantní vid.

Použitím uvedených modelů dosáhneme podobných výsledků koeficientu makroohybových ztrát pro optická vlákna se skokovým indexem lomu. Koeficient ztráty makroohyby α lze převést na jednotku dB/km. Převedení na tyto jednotky lze získat pomocí rovnice 2.17 [20], [16] nebo u prvních dvou modelů vynásobením 2α koeficientem 4.343.

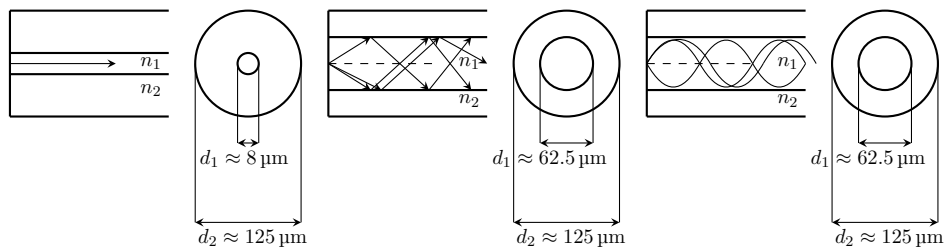
$$\alpha_{\text{makroohyby}} = \frac{10}{L} \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{10}{L} \cdot \log[\exp(\alpha L)] = \frac{10}{\ln(10)} \cdot \alpha \quad (2.17)$$

Kapitola 3

Rozdělení optických vláken

V této kapitole je nejprve představeno rozdělení optických vláken. Hlavním zaměřením jsou jednovláková optická vlákna dle standardů G.652.D a G.657 od ITU (ITU - International Telecommunication Union). V další části této kapitoly jsou popsány mikrostrukturální optická vlákna, jejich rozdělení a odolnost z hlediska makroohybových ztrát.

Obecně můžeme rozdělit optická vlákna na základě profilu indexu lomu a to na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a na vlákna s gradientní změnou indexu lomu. Dále lze optická vlákna dělit dle počtu vedených vidů. Pokud optické vlákno přenáší pouze jeden vid, jedná se o jednovlákové vlákno, jestliže vlákno přenáší více vidů, nazývá se mnohovlákové vlákno. Přehled struktur konvenčních optických vláken je zobrazen na obrázku 3.1.



(a) : Jednovlákové vlákno

(b) : Mnohovlákové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

(c) : Mnohovlákové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

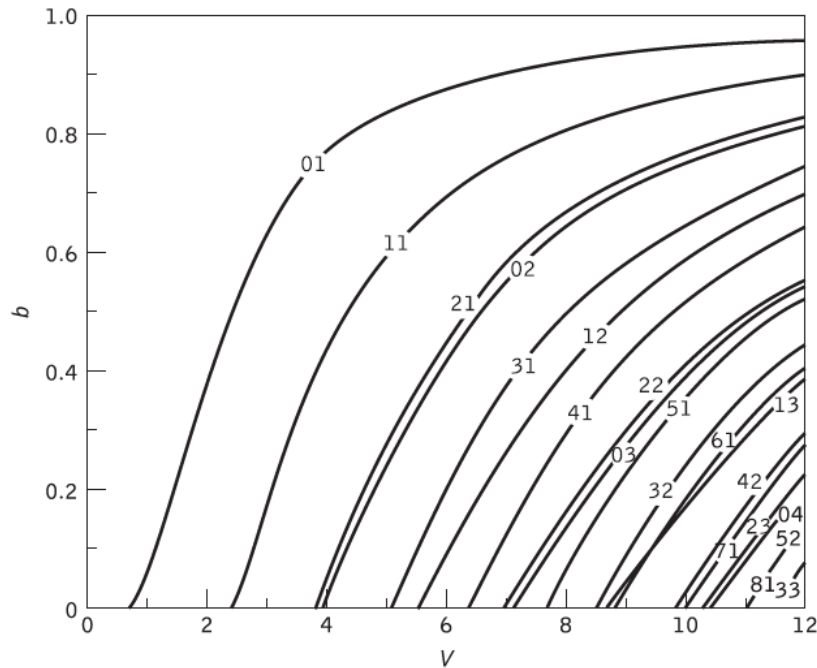
Obrázek 3.1: Rozdělení optických vláken

Počet vidů, kterých je vlákno schopno vést, lze zjistit pomocí normalizovaného kmitočtu V a normalizované konstanty šíření b ,

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.1)$$

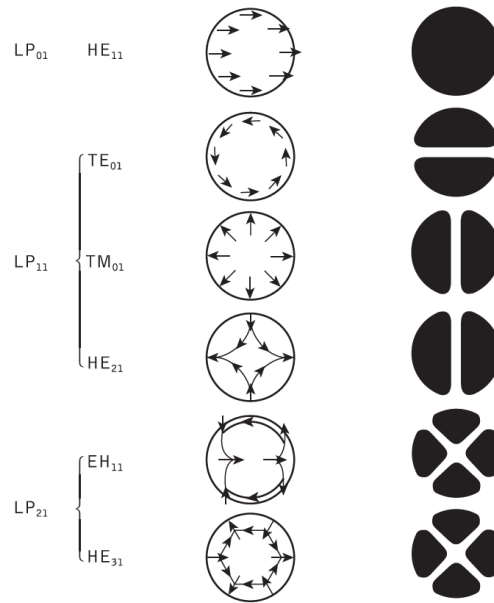
$$b = \frac{n_{eff} - n_2}{n_1 - n_2}, \quad (3.2)$$

kde a je poloměr jádra vlákna, n_1 je index lomu jádra, n_2 je index lomu pláště, n_{eff} je efektivní index lomu. Normalizovaný kmitočet u jednovidového vlákna nesmí překročit hodnotu 2.40483. Aby vlákno splnilo tuto podmínku, je nutné pracovat s malým rozdílem indexu lomu, vlákno musí mít malý průměr jádra v jednotkách μm a je nutné pracovat na určité vlnové délce. Vlákno s hodnotou $V > 2.40483$ podporuje mnoho vidů, jak je zobrazeno na obrázku 3.2. Z rovnice 3.1 vyplývá, že normalizovaný kmitočet je především závislý na poloměru jádra vlákna, vlnové délce a indexů lomu jádra a pláště [28].



Obrázek 3.2: Normalizovaná konstanta šíření b jako funkce normalizované frekvence V pro několik vláknových režimů nízkého řádu [28]

Na obrázku 3.2 jsou zobrazeny lineárně polarizované vidy. Lineárně polarizované vidy jsou značeny LP_{lm} , kde l , m popisují profil intenzity elektrického pole. LP vidy jsou přibližná řešení pro celou sadu HE, EH, TE, TM vidům. Tyto kombinace vidů jsou zobrazeny na obrázku 3.3. Vid TE má intenzitu elektrického pole v ose z nulovou a vid TM má intenzitu magnetického pole v ose z nulovou. HE a EH jsou hybridní vidy, kde intenzity elektrického pole a magnetického pole v ose z nejsou nulové. Označení HE a EH je v závislosti na tom, zda komponenty H nebo E více přispívají k příčné ose (ose vlákna) pole.



Obrázek 3.3: Konfigurace elektrického pole pro tři LP vidy [28]

3.0.1 Jednovidové vlákno

Jednovidová vlákna umožňují šíření pouze vidu LP_{01} (HE_{11}), který je videm dominantním. Jednovidové vlákno je navrženo tak, že všechny vidy vyššího řádu nejsou vedeny, pokud je překročena mezní vlnová délka (typicky 1260 nm). Jednovidová vlákna mají obvykle jádro s průměrem pouze 8 až 10 μm a rozdíl indexu lomu mezi jádrem a pláštěm v řádu tisícín. Výhodou jednovidových vláken je, že u nich nedochází k vidové disperzi. To je zásadní pro jejich použití pro vysoké přenosové rychlosti. Struktura jednovidového vlákna je vidět na obrázku 3.1a [24].

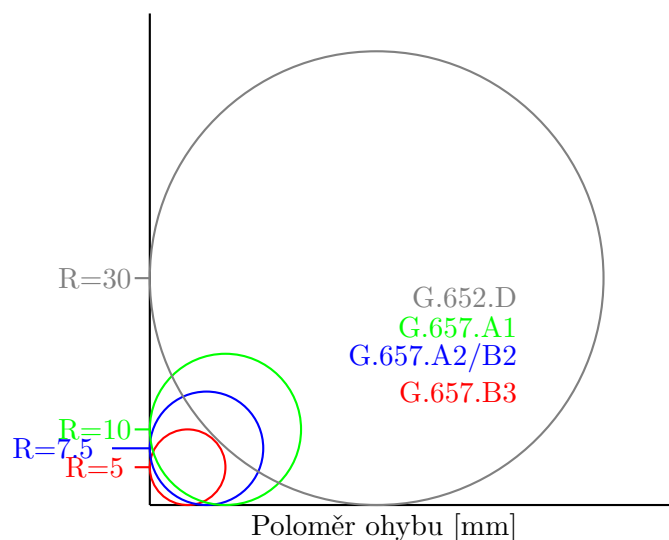
3.1 Vlákna odolná na ohyb

Nevýhoda jednovidových vláken je, že jsou citlivá na ohyb. Citlivost na ohyb je způsobena tím, že jednovidová vlákna se vyznačují slabým vedením vlny. To je způsobeno malým rozdílem indexů lomu Δ , který je v řádu tisícín, jak již bylo zmíněno v sekci 3.0.1.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.3)$$

Pokud je vlákno ohnuto, je narušena podmínka pro vedení vlny, energie se vyzáří do pláště, a tím vzniká útlum. Ve vlákně se díky ohybu vytváří vyšší vidy, které zhoršují přenosové vlastnosti vlákna, a proto jsou nežádoucí. Tyto vyšší vidy vznikají lineární kombinací TE a TM vidů. Proto

byly vyvinuty nové typy jednovidových vláken, které jsou odolnější na ohyb. Strukturu a parametry těchto vláken doporučuje ITU. Na obrázku 3.4 jsou znázorněny rozličné typy jednovidových optických vláken odolných na ohyb a jejich maximální poloměry ohybu, pro které jsou definovány.



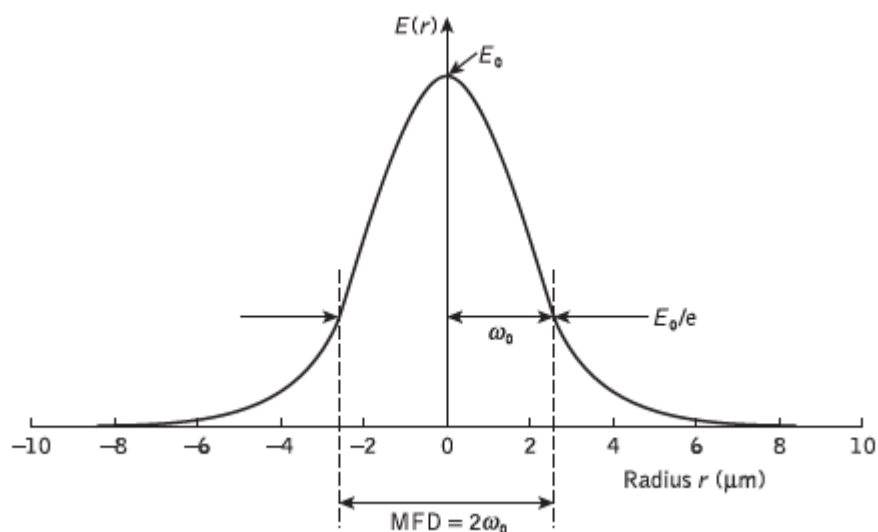
Obrázek 3.4: Typy jednovidových optických vláken odolných na ohyb [9]

3.1.1 Doporučení ITU-T pro jednovidové vlákno G.652

Doporučení ITU-T G.652 popisuje geometrické, mechanické a přenosové parametry jednovidového optického vlákna. ITU-T G.652 vlákna byla původně optimalizována pro použití v oblasti vlnové délky 1310 nm, ale lze také použít pro oblast vlnové délky 1550 nm [7]. Pro vlákno G.652.D je definováno několik parametrů, které musí splňovat. Definované parametry jsou:

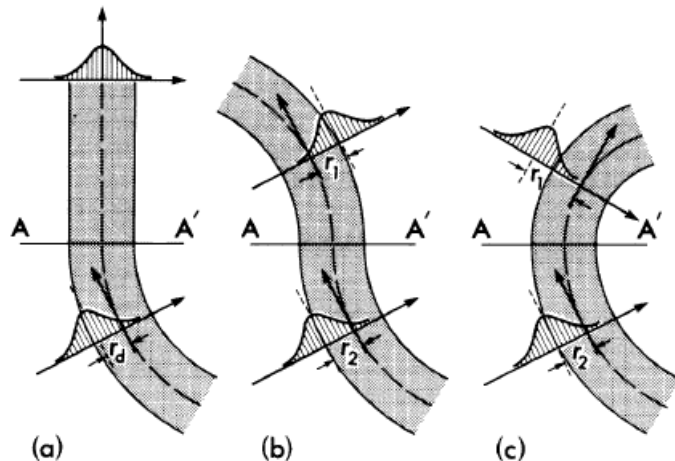
■ Průměr vidového pole

Průměr vidového pole (MFD - Mode field diameter) je důležitý parametr pro popis jednovidového vlákna, který vyjadřuje rozložení záření v optickém vlákne a zohledňuje průnik části pole do pláště vlákna v závislosti na vlnové délce. MFD se obecně definuje jako vzdálenost mezi protilehlými body amplitudy pole $\frac{1}{e}$ viz obrázek 3.5. Pro profily indexu lomu při typických vlnových délkách je MFD větší než průměr jádra jednovidového vlákna. S narůstající vlnovou délkou narůstá i velikost MFD, protože index lomu křemene s vlnovou délkou klesá, tím klesá rozdíl indexů lomu mezi jádrem a pláště, to má za důsledek slabé vedení vlny [28]. Rozsah průměru vidového pole je od 8,6 do 9,2 μm a její tolerance je $\pm 0,4 \mu\text{m}$. U vlákna G.652.D je jmenovitá hodnota tolerance kolem této hodnoty stanovena při 1310 nm.



Obrázek 3.5: MFD v jednojádřovém vlákně

Velikost průměru vidového pole ovlivňuje citlivost vlákna na ohyb. S rostoucí velikostí průměru vidového pole dochází při ohybu k větším ztrátám. Příklad ztrát a vyvazování pole z vlákna způsobené ohybem je zobrazen na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Posun Gaussovského svazku ve vlákně způsobený ohybem vlákna [30]

Průměr vidového pole pro jednojádřové vlákno se skokovým indexem lomu lze odhadnout z poloměru jádra a , normalizované frekvence (pro jednojádřové vlákno musí být $V \leq 2.40483$) pomocí rovnice 3.4 [4].

$$MFD \approx 2a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (3.4)$$

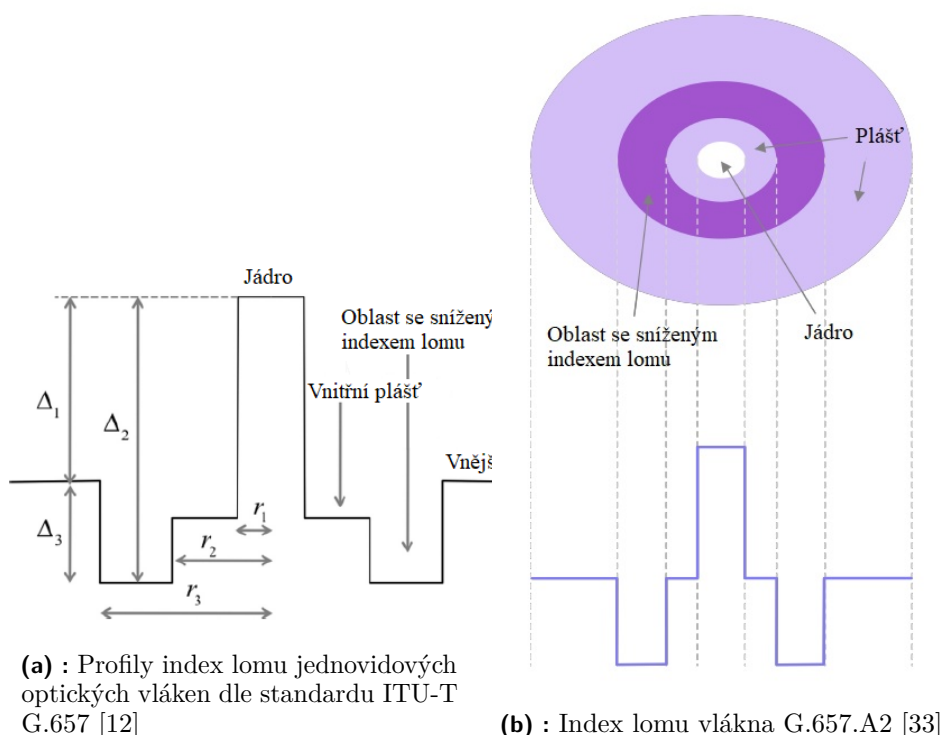
Na obrázku 3.7 jsou vidět struktury indexu lomu vlákna [8]. Vlákno G.657 má definované hodnoty pro určité parametry vlákna podobně jako u G.652.

■ Profil indexu lomu

Profil indexu lomu se skládá z jádra, vnitřního pláště, oblasti se sníženým indexem lomu a vnějšího pláště. Vnitřní plášť má o něco nižší index lomu než vnější plášť. Větší odolnosti vůči ohybu se dosahuje pomocí oblasti se sníženým indexem lomu. Oblast má relativně nižší index lomu než jádro a vnitřní obal, paprsek tedy přechází z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího, na rozhraní se láme a část se dostává zpět do jádra. Typické hodnoty parametrů indexu lomu jsou $\Delta_1 = 0.35 \sim 0.70\%$, $\Delta_2 = 0$, $\Delta_3 = -0.25\%$, kde Δ_1 je rozdíl indexů lomu mezi vnějším pláštěm a jádrem vlákna, Δ_2 je rozdíl indexů lomů mezi jádrem a oblastí se sníženým indexem lomu a Δ_3 je rozdíl indexů lomů mezi vnějším pláštěm a již zmíněnou oblastí. Poloměr vnitřního pláště je r_2 , který lze získat ze vztahu 3.5. Poloměr oblasti se sníženým indexem lomu je značen r_3 a jeho hodnotu lze vypočítat z rovnice 3.6 [12].

$$r_2 = r_1 \cdot 3.5 \quad (3.5)$$

$$r_3 = r_1 \cdot 5.5 \quad (3.6)$$



Obrázek 3.7: Indexy lomu vláken typu G657

Na obrázku 3.7b je znázorněna struktura indexu lomu pro vlákno G.657.A2 od firmy Sterlite Tech, které je následně simulováno v praktické části této práce.

■ Ztráty makroohyby

Ztráty makroohyby se liší v závislosti na vlnové délce, poloměru ohybu a počtu závitů kolem tyče se specifikovaným poloměrem. Ztráta makroohybem nesmí přesáhnout maximální hodnotu uvedenou v tabulce 3.1 v sekci 3.1.3 pro stanovené vlnové délky, poloměry ohybů a počet závitů.

■ Další parametry

Parametry průměru vidového pole, průměr pláště, chyba soustřednosti jádra, nekruhovitosti pláště, mezní vlnová délka, materiálové vlastnosti vlákna jsou totožné jako u doporučení ITU-T G.652.

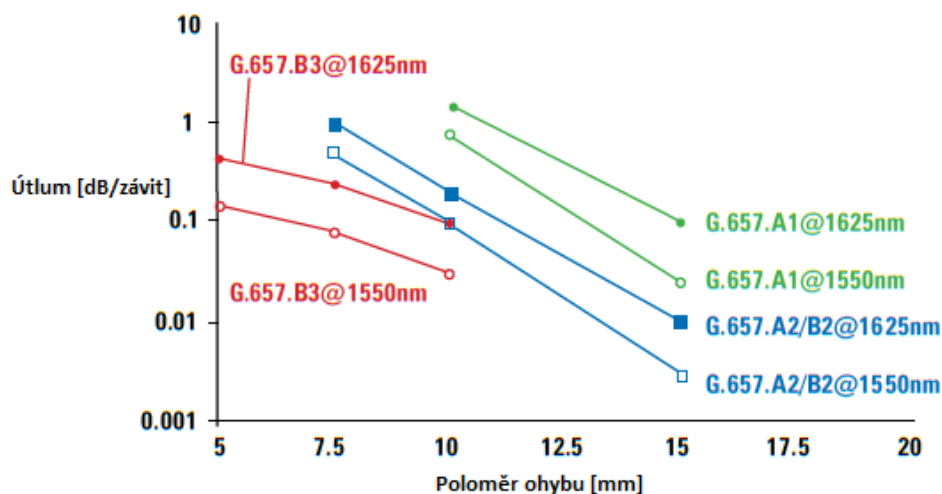
■ 3.1.3 Porovnání vláken G.652 a G.657

V tabulce 3.1 jsou porovnané hodnoty útlumu způsobené makroohybem při určitém poloměru ohybu.

Tabulka 3.1: Hodnoty útlumů při ohybu pro vlákna G.652 a G.657 [7], [8]

ITU-T	G.652.D	G.657.A1	G.657.A2	G.657.B2	G.657.B3
Poloměr [mm]	30	15 10	15 10 7.5	15 10 7.5	10 7.5 5
Počet závitů	100	10 1	10 1 1	10 1 1	1 1 1
Max. útlum na 1550 nm [dB]	-	0.25 0.75	0.03 0.1 0.5	0.03 0.1 0.5	0.03 0.08 0.15
Max. útlum na 1625 nm [dB]	0.1	1.0 1.5	0.1 0.2 1.0	0.1 0.2 1.0	0.1 0.25 0.45

Na obrázku 3.8 jsou vyneseny maximální stanovené hodnoty pro makroohybové ztráty do grafu. Na ose x je poloměr ohybu a na ose y jsou hodnoty útlumu způsobené ohybem vlákna. Útlum je měřen na dvou vlnových délkách a to 1550 nm a 1625 nm.



Obrázek 3.8: Makroohybové ztráty pro ITU-T G.657 vlákna [9]

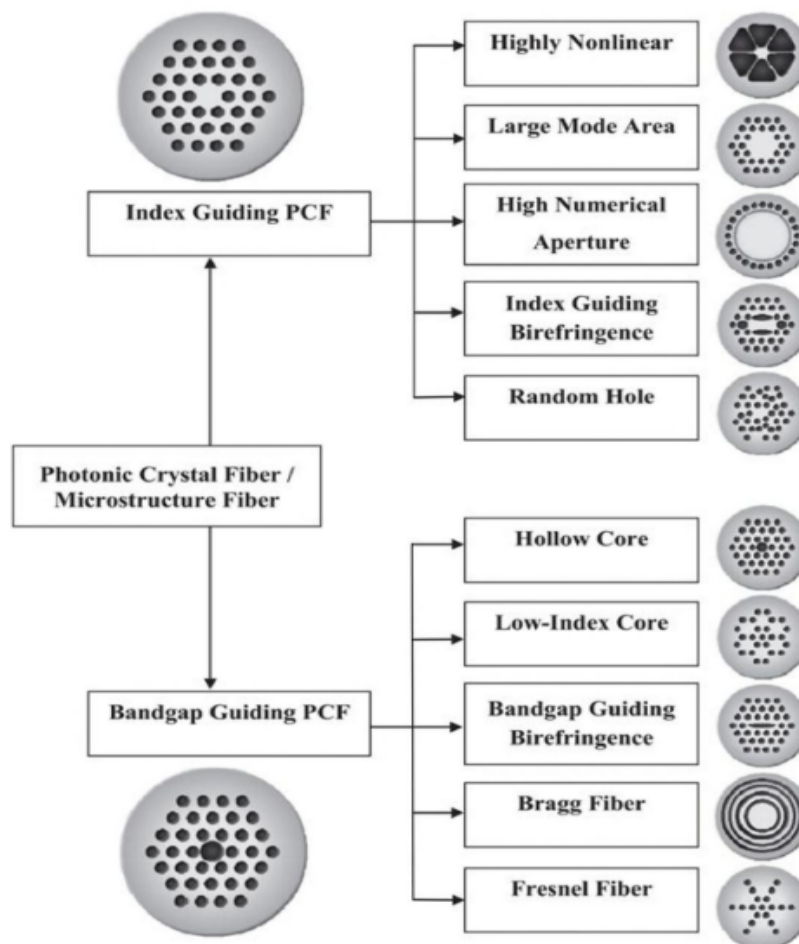
Existuje další typ optických vláken, který vykazuje vyšší odolnost vůči makroohybovým ztrátám. Jedná se o mikrostrukturální optická vlákna.

3.1.4 Mikrostrukturální optická vlákna

Mikrostrukturální optická vlákna jsou speciální optická vlákna s vnitřní mikrostrukturou. Oproti obvykle používaným vláknům mají mikrostrukturální vlákna jiné disperzní vlastnosti, vyšší numerickou aperturu, téměř konstantní velikost stopy vidového pole či dokáží pracovat v jednovidovém režimu přes velký rozsah vlnových délek. Jejich vnitřní struktura se většinou skládá z periodicky uspořádaných vzduchových otvorů ve skelné matici, které jsou paralelní s osou šíření. Velikostí vzduchových otvorů, vzdáleností mezi otvory a jejich uspořádáním (hexagon, trojúhelník, čtverec, atp.) získává mikrostrukturální vlákno své vlnovodné vlastnosti a díky nim lze základní parametry vlákna měnit. Vzduchové otvory lze vytvořit pomocí tzv. "stack and draw" technologie, při použití preformy s otvory vyrobenými například naskládáním několika užších křemenných kapilár. Obvykle je tato preforma nejprve tažena do tyče s průměrem například 1 mm, a poté do vlákna o konečném průměru např. 125 μm . Mikrostrukturální optické vlákno má složitější vnitřní strukturu a je tedy charakterizováno více parametry než klasická optická vlákna [23].

Těmito parametry jsou průměr jádra, průměr vlákna, průměr mikrostrukturálních otvorů d , rozteč jednotlivých mikrostruktur Λ , materiál skla, druh jádra (duté, plné), počet prstenců. Mikrostrukturální vlákna se rozdělují do dvou kategorií podle toho, jak vedou optický signál: vlákno na principu modifikovaného totálního odrazu a duté vlákno typu photonic-bandgap (optický zakázaný pás). Tyto hlavní dvě kategorie se poté dělí do podkategorií podle

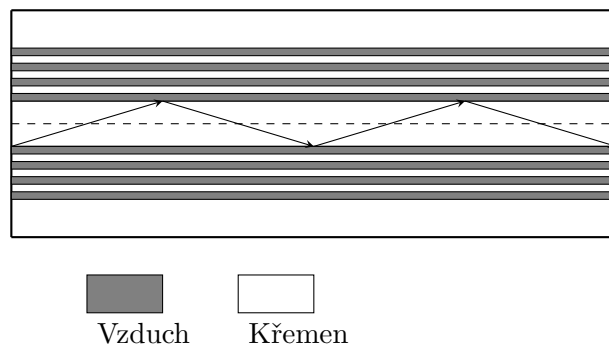
struktury a optických vlastností vláken. Podrobnější rozdělení je znázorněno na obrázku 3.9 [13].



Obrázek 3.9: Rozdělení mikrostrukturálních vláken [13]

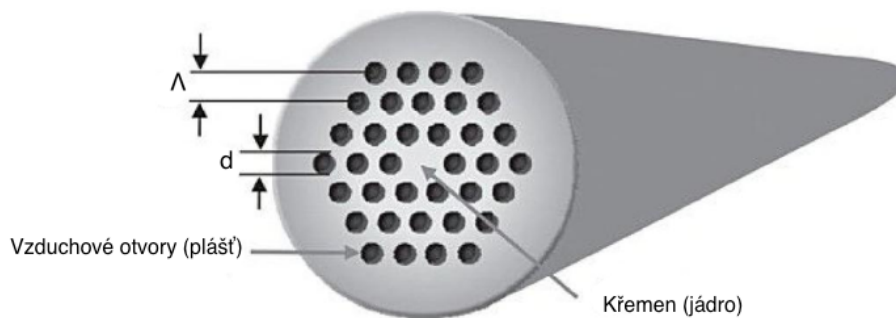
■ Mikrostrukturální vlákno na principu modifikovaného totálního odrazu

Mikrostrukturální vlákno na principu modifikovaného totálního odrazu (index-guiding PCF - Photonic Crystal Fiber) má pevné jádro a okolo něj jsou vzduchové díry v hexagonální struktuře. Vlákná na principu modifikovaného totálního odrazu jsou podobná konvenčním vláknům v tom smyslu, že jejich jádro má větší index lomu než plášť. Pro dosažení totálního odrazu je nutné, aby pro konstantu šíření platilo $\beta = kn$. Pokud pro konstantu šíření bude navíc platit $k < \beta < kn_g$, kde n_g je index lomu skla, tak se paprsek bude šířit pouze ve skle a ve vzduchových otvorech bude evanescentní [10]. Na obrázku 3.10 je zobrazen mechanismus šíření paprsku v mikrostrukturálním vlákně na principu totálního odrazu.



Obrázek 3.10: Mechanismus šíření paprsku ve vlákne s pevným jádrem [11]

Běžný typ mikrostrukturálního vlákna typu s pevným jádrem má trojúhelníkovou strukturu vzduchových otvorů, přičemž ve středu vlákna je vytvořen defekt vynecháním jednoho otvoru viz Obr. 3.11. Díky vzduchovým otvorům je index lomu pláště snížen. Většina vláken je vyrobena z čistého křemene [23].



Obrázek 3.11: Mikrostrukturální optické vlákno s pevným jádrem [13]

Další typy mikrostrukturálního vlákna s pevným jádrem:

- **Highly Nonlinear**

Je vysoce nelineární mikrostrukturální vlákno, které je navrženo s malým jádrem ($2\ \mu\text{m}$ až $5\ \mu\text{m}$) pro získání velkého nelineárního koeficientu a s velkým kontrastem indexu lomu [3].

- **Large mode area**

Jedná se o mikrostrukturální vlákno s velkou vidovou plochou (velkým vidovým polem). Vlákno má velkou plochu dominantního vidu a dokáže přenášet signál v jednovidovém režimu přes velké rozmezí vlnových délek ($750\ \text{nm}$ až $1700\ \text{nm}$).

- **High Numerical Aperture**

Je mikrostrukturální vlákno s velkou numerickou aperturou.

- **Index Guiding Birefringence**

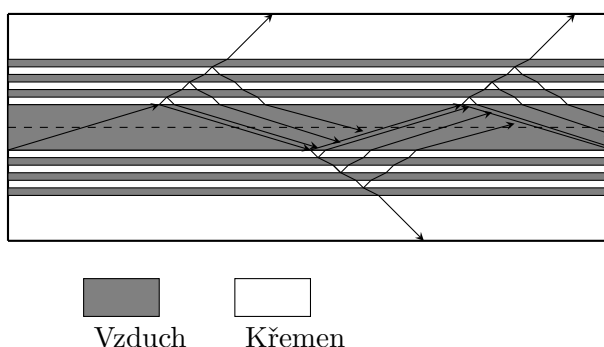
Jde o mikrostrukturální vlákno, které dokáže potlačit polarizačně vidovou

disperzi pomocí dvojlomu. Dvojlom je dosažen pomocí vytvoření jádra eliptického tvaru.

■ Mikrostrukturní vlákno s dutým jádrem

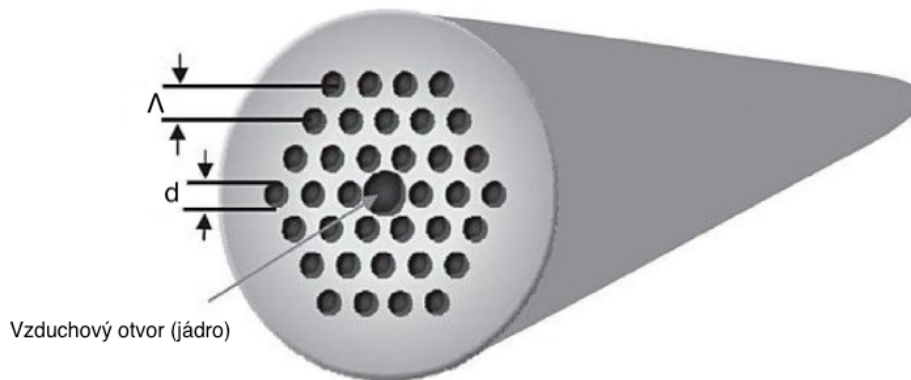
Tato vlákna využívají pro vedení světla princip Braggovského zrcadla a optického zakázaného pásma (Photonic Bandgap, PBG). Oba principy spočívají v tom, že pomocí určitého uspořádání pláště je možné potlačit šíření vlny v radiálním směru vzhledem ke směru šíření pro určité vlnové délky. Na rozdíl od vláken s pevným jádrem, není požadováno, aby index lomu jádra byl větší než index lomu pláště.

U Braggovských dutých vláken se využívá dvourozměrné Braggovo zrcadlo, které se skládá ze dvou vrstev dielektrik s různými indexy lomu. Světlo, které dopadá na Braggovo zrcadlo, se na každé vrstvě odráží s danou fází. Pro konkrétní vlnové délky dochází ke konstruktivní interferenci odražených vln.



Obrázek 3.12: Mechanismus šíření paprsku v Braggovském optickém vlákně s dutým jádrem [11]

Jedním z mikrostrukturních vláken s dutým jádrem neboli vlákno typu hollow-core. Struktura hollow-core vlákna je zobrazena na obrázku 3.13. Základem je duté jádro, které je vyplněno vzduchem. Průměr jádra je 7 krát až 20 krát větší než průměr ostatních vzduchových děr. Pro šíření paprsku ve vlákně využívá hollow-core vlákno princip optického zakázaného pásma (tzv. photonic bandgap). Zakázané pásmo určuje rozsah vlnových délek, které se nešíří ve směru radiálním, čili skrze mikrostrukturu. Pomocí principu optického zakázaného pásma je optická vlna uvězněna uvnitř dutého jádra, ve kterém se přenáší více než 98% energie vlny. To výrazně snižuje celkový útlum a vlákno je pak dobrým kandidátem na budoucí použití v telekomunikačních systémech [13, 25, 22, 21].



Obrázek 3.13: Hollow-core PCF [13]

3.1.5 Ztráty makroohyby u mikrostrukturálních vláken

U mikrostrukturálních vláken je citlivost na ohyb závislá především na poloměru ohybu, ale také na vlnové délce, velikosti roztečí mezi vzduchovými otvory a průměry otvorů. Pokud je splněna podmínka $\lambda \gg \Lambda$, tak je vlákno citlivější na ohybové ztráty, protože pole může uniknout mezi vzduchovými otvory z vlákna. Kritický poloměr ohybu mikrostrukturálního vlákna lze vypočítat z rovnice 3.7 [10].

$$R_c \sim \frac{\Lambda^3}{\lambda^2} \quad (3.7)$$

U mikrostrukturálních vláken s pevným jádrem záleží na poměru $\frac{d}{\Lambda}$. Jestliže je výsledný poměr $\frac{d}{\Lambda}$ vysoký, tak je vlákno odolnější vůči makroohybům. Kritický poloměr ohybu je závislý na vzdálenosti mezi otvory ve vlákně.

Mikrostrukturální vlákna, která mají větší průměry otvorů a tedy větší poměr $\frac{d}{\Lambda}$, jsou méně citlivá na ztráty ohybem. Poměr $\frac{d}{\Lambda}$, ale omezuje především velikost pole a nutnost pracovat v jednovlnovém režimu. Odolnost vůči makroohybům lze zvýšit i změnou konfigurace otvorů. Hollow-core mikrostrukturální vlákna mají velký rozdíl mezi indexem lomu jádra a indexem lomu pláště, což vede k robustnímu vedení vidu i přes velký ohyb. Hollow core vlákno je tedy odolné vůči makroohybovým ztrátám [25].

Kapitola 4

Metody měření ztrát makroohybem optických vláken

Tato kapitola pojednává o způsobu měření makroohybových ztrát optických vláken. Rozebírá postup měření makroohybových ztrát dle doporučení od ITU. Dále se zabývá jednotlivými metodami způsobu měření makroohybových ztrát.

Postup měření ztrát makroohyby je popsán v doporučení G.650.1 od ITU a ve standardu IEC 60793 (IEC - International Electrotechnical Commission) [31] [32] od mezinárodní elektrotechnické komise.

Účelem měření ztrát makroohyby je získat hodnoty přenášeného výkonu v jednovidovém vlákne, které je ohnuto pod určitým poloměrem. Standardy definují pro jednovidové vlákna metodu namotávání vlákna (Fibre winding). Pro tento způsob měření útlumu lze optický výkon změřit dvěma způsoby:

- **metodou monitorování výkonu** (the power-monitoring technique), která měří přenášený výkon a jeho následné snížení v důsledku změny z přímého do ohnutého stavu.
- **metoda dvou délek** (the cut-back technique), která měří celkový útlum vlákna. Aby bylo možné stanovit útlum způsobený makroohybem, měla by být tato hodnota korigována na celkový útlum vlákna.

Pro korektní měření musí být známa délka vlákna, poloměr ohybu R , počet závitů N . Počty závitů a hodnoty poloměrů by měly odpovídat definovaným hodnotám z příslušných doporučení (ITU-T G.652, ITU-T G.657). Měřicí aparatura se skládá z ohýbacího nástroje a měřiče výkonu (ztrát). Měření lze provést na vzorcích s úplným navinutím 360° nebo s částečným navinutím 180° nebo pro čtvrt navinutí 90° . Měřič výkonu používá techniku monitorování přenášeného výkonu [31], přičemž je třeba dbát na správné dodržení uvedených podmínek měření pro konkrétní typy vláken.

Doporučený postup měření:

Vlákno se volně navine na nástroj (válec o definovaném poloměru). Při vinutí by se mělo vyhnout nadměrnému kroucení vlákna. Počet vinutí, poloměr zakřivení a vlnová délka jsou nastaveny na hodnoty, při nichž se měří ztráta. Délka vlákna mimo testovací část musí být bez ohybů. Ohyb vlákna by mohl způsobit významnou změnu výsledku měření. Poloměr navinutí přebytečné délky vlákna je doporučen nejméně 140 mm.

Při prezentaci výsledků by mělo být zmíněno uspořádání měřicí aparatury, typ měřeného vlákna, délka měřeného vzorku, poloměr ohybu vlákna, počet vinutí, vlnová délka a výsledný útlum způsobený makroohyby.[6]

4.1 Metoda dvou délek

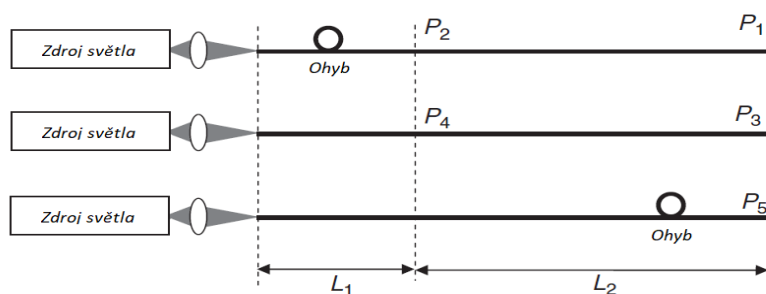
Metoda měření útlumu dvou délek je použita u měření makroohybu kvůli odečtení útlumu vlákna v místech, kde není namáháno na ohyb. Pomocí metody dvou délek je možné změřit útlumový koeficient vidů LP_{01} a LP_{11} . Obrázek 4.1 ilustruje techniku měření koeficientu útlumu, jak základního vidu LP_{01} , tak vyššího vidu LP_{11} . Ztráta ohybem je u vidu LP_{11} mnohem vyšší než u vidu LP_{01} .

Postup měření je následující: Nejprve je vlákno ohnuto o poloměru 1–2 cm poblíž vstupního konce vlákna a jsou změřeny výkony P_1 a P_2 na délkách vláken $L_1 + L_2$, respektive L_1 . Ohyb na vlákně je roven vidovému filtru, který potlačí výkon přenášený videm LP_{11} . Útlumový koeficient pro vid LP_{01} může být vypočítán jako 4.1.

$$\alpha_{01} = \frac{1}{L_2} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.1)$$

V další kroku je vlákno nataženo a měřené v nataženém stavu. V tomto případě výkony P_3 a P_4 obsahují výkony vidů LP_{01} a LP_{11} . Jako poslední krok je měřeno vlákno s ohybem na konci vlákna, takže výkon P_5 obsahuje pouze výkon vidu LP_{01} . Útlumový koeficient pro vid LP_{11} lze spočítat pomocí rovnice 4.2 [26].

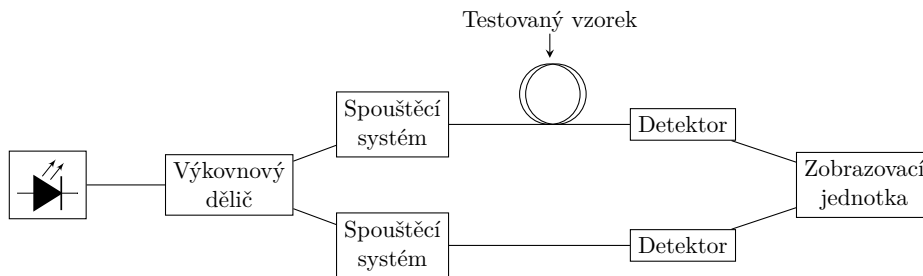
$$\alpha_{01} = \frac{1}{L_2} \ln \left(\frac{P_1 P_4 - P_2 P_5}{P_1 P_3 - P_1 P_5} \right) \quad (4.2)$$



Obrázek 4.1: Metoda měření dvou délek

4.2 Metoda monitorování výkonu

Výkon v optickém vlákně lze monitorovat pomocí dvou různých měřících aparatur. První metoda monitorování výkonu je založena na porovnání testovaného (na ohyb namáhaného) s referenčním vláknem, které není namáháno na ohyb. Zapojení měřící aparatury je zobrazeno na obrázku 4.2. Díky porovnání s referenčním vláknem je možné dosáhnout přesnějšího měření, protože lze vyloučit jakoukoliv změnu signálu ve zdroji.



Obrázek 4.2: Měření změny optického výkonu pomocí referenčního vzorku [31]

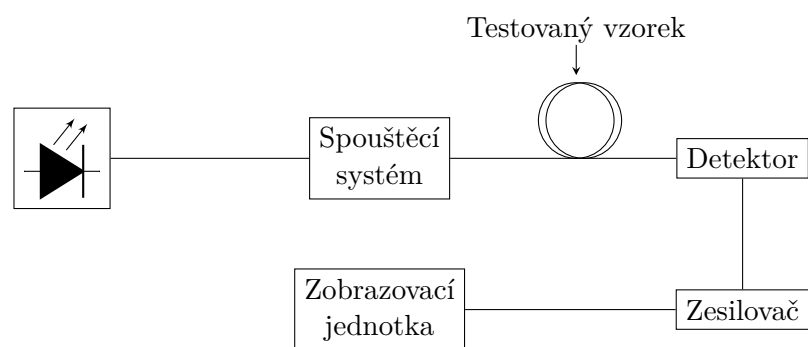
Výslednou hodnotu útlumu lze získat z následující rovnice

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_{0r} \times P_{nt}}{P_{0t} \times P_{nr}}, \quad (4.3)$$

kde P_{0r} a P_{0t} jsou počáteční výkony a P_{nr} a P_{nt} jsou výstupní výkony na konci testovaného a referenčního vzorku. Index malé r je pro referenční vlákno a index malé t je pro testované vlákno.

Druhá měřící aparatura využívá stabilní optický zdroj a výsledné hodnoty neporovnává s referenčním vláknem. Zapojení druhé aparatury lze vidět na obrázku 4.3. Výsledný útlum je tedy možné spočítat z rovnice 4.4 [31].

$$A = 10 \text{Log} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.4)$$



Obrázek 4.3: Měření změny optického výkonu pomocí stabilního zdroje [31]

Kapitola 5

Simulace

Simulace ohybu optických vláken byly realizované pomocí simulačního modulu BeamPROPTM, který je součástí RSoft Photonics Suite od společnosti Synopsys[®]. BeamPROP slouží k návrhu a simulaci optických vláken a různých 2D nebo 3D struktur. Software je založen na metodě šíření paprsku BPM (BPM - Beam Propagation Method). BPM je metoda pro simulaci šíření paprsku optických vlnovodech, jež je formulována jako řešení Helmholtzovy rovnice v časové doméně.

Simulace vláken slouží k získání hodnot útlumu, kterých je možné dosáhnout při reálném měření makroohybových ztrát. Pro modelování makroohybů byla vybrána dvě vlákna. První simulované vlákno je vlákno G.652.D, které je použito jako referenční. Druhé simulované vlákno je dle standardu G.657. Jedná se o vlákno G.657.A2, které má rozdílný index lomu oproti G.652.D, což vede k větší odolnosti vůči makroohybovým ztrátám. Poslední simulované vlákno je ESM-12B. Na tomto mikrostrukturním vláknu byla sledována velikost MFD v závislosti na vlnové délce. Výsledná data ze simulací jsou zpracována v prostředí MATLAB.

5.1 Simulace vlákna G.652.D

Vlákno G.652.D je modelováno podle doporučení ITU-T G.652 [7]. Jedná se o jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu. Indexy lomu jádra (n_1) a pláště vlákna (n_2) výrobci ve specifikacích vlákna neuvádějí, proto je potřeba je dopočítat ze Sellmeierovy rovnice

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i}, \quad (5.1)$$

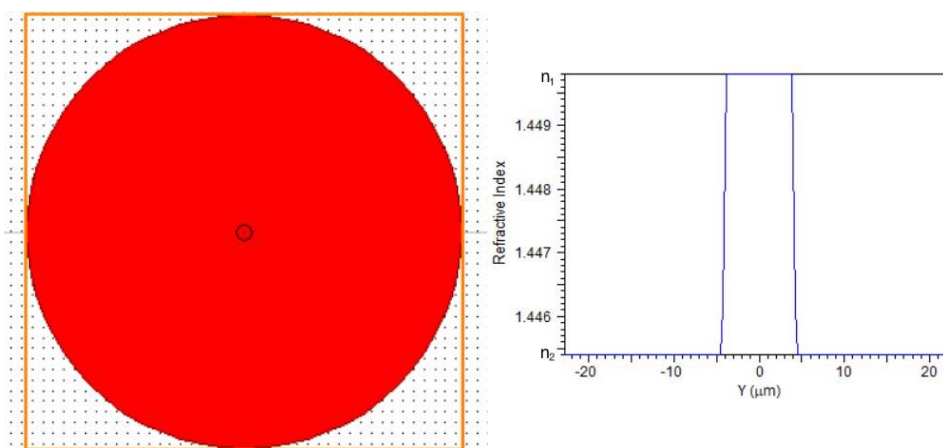
kde λ je vlnová délka, a_i a b_i jsou Sellmeierovy koeficienty, jejichž hodnota byla získána z [1]. Pro index lomu jádra byly použity koeficienty ze vzorku 4, pro index lomu pláště ze vzorku 6 ze zdroje [1]. Indexy lomu pro stanovené vlnové délky jsou uvedeny v tabulce 5.1. Průměr jádra vlákna byl dle doporučení

stanoven na $8.2 \mu\text{m}$. Díky znalosti poloměru jádra je možné výpočtem MFD z rovnice 3.4 ověřit správnost simulace vlákna. Pokud vypočtená hodnota odpovídá doporučení G.652.D jedná se o korektní simulaci. Další variantou ověření, zda je simulace správně provedena, je spočítat počet vidů šířících se ve vlákně. V jednovidovém vlákně se šíří pouze jeden vid.

Modelované vlákno je dlouhé $10000 \mu\text{m}$, což je dostatečná délka pro ustálení vidu ve vlákně. Pokud by bylo vlákno delší, celková simulace by probíhala v jednotkách až desítkách hodin, což je pro účely simulace zbytečné. Na obrázku 5.1 lze vidět náhled na simulované vlákno G.652.D v ose z a jeho index lomu.

Tabulka 5.1: Hodnoty indexů lomu pro vlákno G.652.D

Vlnová délka [nm]	index lomu jádra n_1	index lomu pláště n_2
1310	1.4498	1.4454
1550	1.4470	1.4425
1625	1.4461	1.4416
2000	1.4412	1.4364



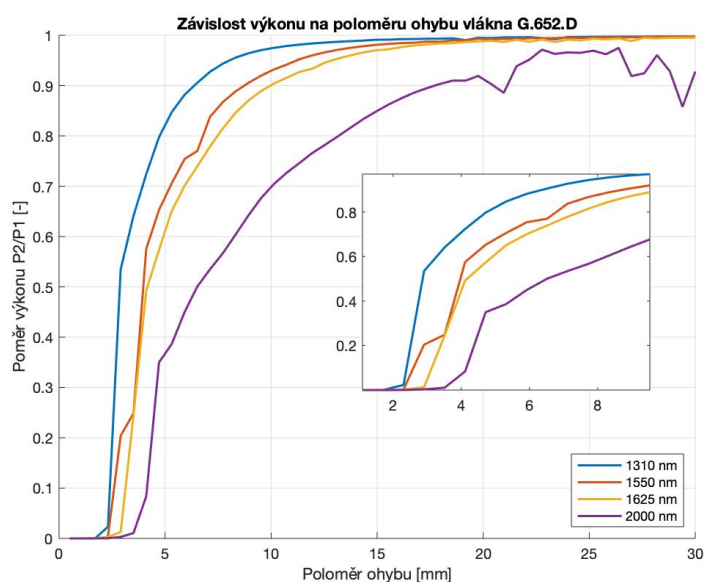
Obrázek 5.1: Vlákno G.652.D a jeho index lomu pro vlnovou délku 1310 nm

5.1.1 Ztráty makroohyby u vlákna G.652

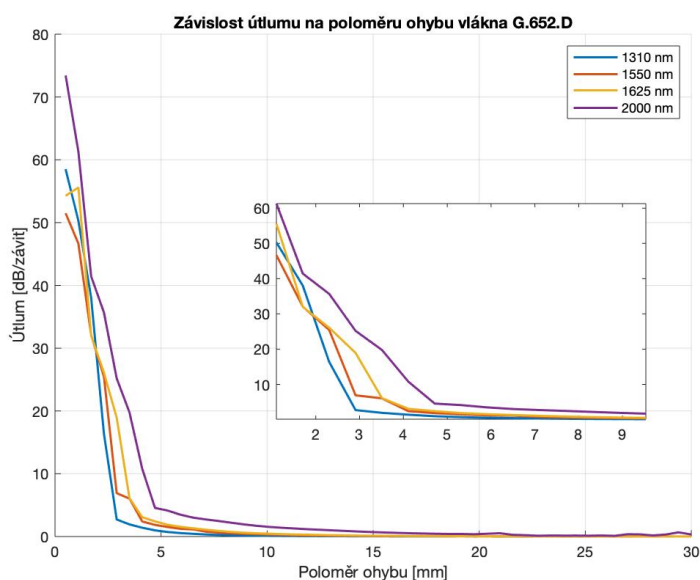
Ztráty makroohyby u vlákna G.652.D byly simulovány pro čtyři vlnové délky (1310 nm, 1550 nm, 1625 nm a 2000 nm). Vlákno je ohýbáno pod různými poloměry, které se pohybují od $500 \mu\text{m}$ do $30000 \mu\text{m}$ s krokem $500 \mu\text{m}$. Mřížka simulace byla nastavena na $0.3 \mu\text{m}$, kde pro korektní simulaci musí být tento parametr vždy nižší než vlnová délka, na které probíhala simulace. Při simulaci byl monitorován poměr výkonu výstupního výkonu (P_2) ku vstupnímu výkonu (P_1) v dominantním vidu LP_{01} .

Z obrázků 5.2a, 5.2b lze vidět, že s narůstající vlnovou délkou se ztráty makroohybem zvyšují. Dochází tedy k potvrzení, že makroohybové ztráty

závisí na vlnové délce. To lze vysvětlit závislostí indexu lomu křemene na vlnové délce. S narůstající vlnovou délkou se index lomu křemene snižuje, to má za důsledek změnu normované frekvence V . Díky zmenšení normované frekvence se zvětší průměr vidového pole, které lze získat z rovnice 3.4. Jak již bylo zmíněno v sekci 3.1.1, tak čím větší je průměr vidového pole, tím více je vlákno náchylné na ztráty způsobené makroohybem.



(a) : Závislost poměru výkonů P_2 a P_1 na poloměru ohybu vlákna G.652.D



(b) : Útlum způsobený makroohybem v závislosti na poloměru ohybu vlákna G.652.D

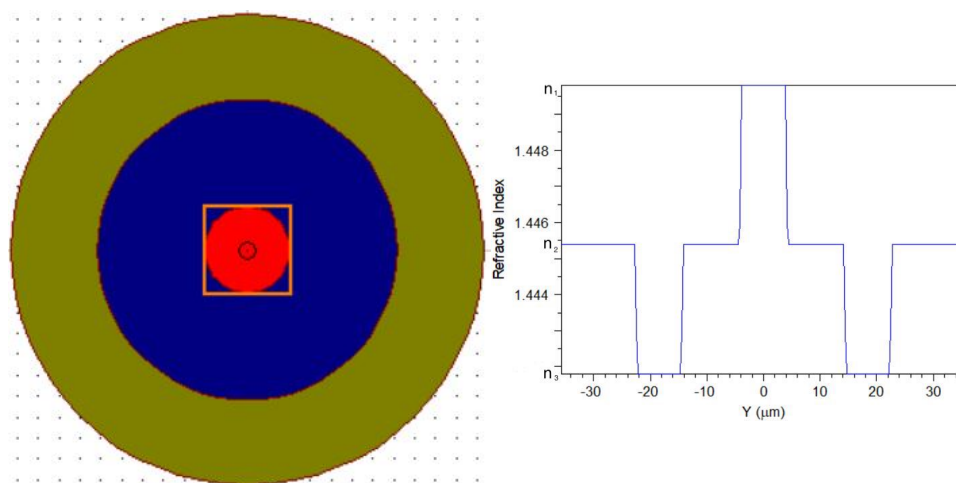
Obrázek 5.2: Simulace makroohybových ztrát u vlákna G.652.D

5.2 Simulace vlákna G.657

Vlákno odolné na ohyb bylo modelováno dle doporučení ITU-T G.657. Simulace tohoto vlákna je komplikovanější než referenčního vlákna G.652.D. Na obrázku 5.3 je vidět simulovaný profil indexu lomu pro vlnovou délku 1310 nm. Průměr jádra je $8.2 \mu\text{m}$, vnitřní plášť má průměr $28.7 \mu\text{m}$, oblast mezi vnitřním a vnějším pláštěm má hodnotu $8.2 \mu\text{m}$. Tato vzdálenost je tzv. "Oblast se sníženým indexem lomu". Vlákno má průměr vnějšího pláště velké $125 \mu\text{m}$. Indexy lomu jádra a pláště byly získány pomocí rovnice 5.1 a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2. Výpočet hodnoty indexu lomu pro oblast se sníženou hodnotou indexu lomu je popsán v sekci 3.1.2. Simulované vlákno G.657 je dlouhé $10000 \mu\text{m}$. Při simulaci byly použité stejné hodnoty poloměru ohybu a parametry simulace byly nastaveny na stejnou hodnotu jako u simulace vlákna G.652.D.

Tabulka 5.2: Hodnoty indexu lomu pro vlákno G.657.A2

Vlnová délka [nm]	index lomu jádra n_1	index lomu vnějšího pláště n_2	oblast se sníženým indexem lomu n_3
1310	1.4498	1.4454	1.4418
1550	1.4470	1.4425	1.4389
1625	1.4461	1.4416	1.4380
2000	1.4412	1.4364	1.4328



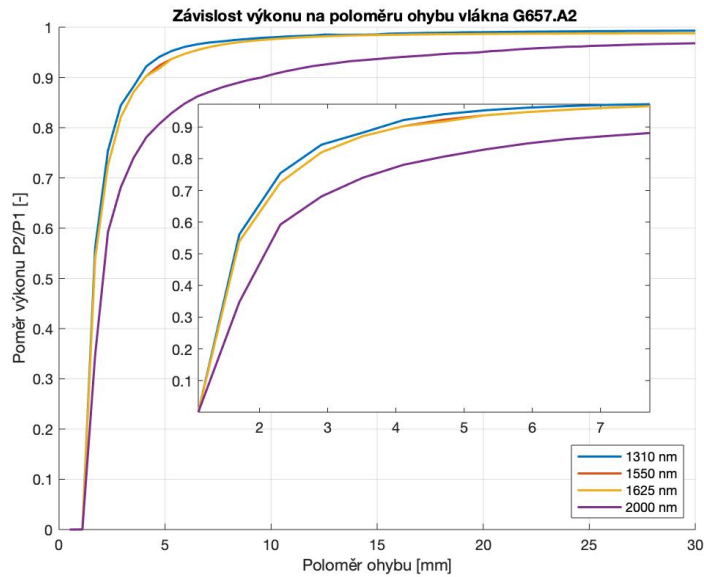
Obrázek 5.3: Vlákno G.657 a jeho index lomu pro vlnovou délku 1310 nm

5.2.1 Ztráty ohyby u vlákna G.657

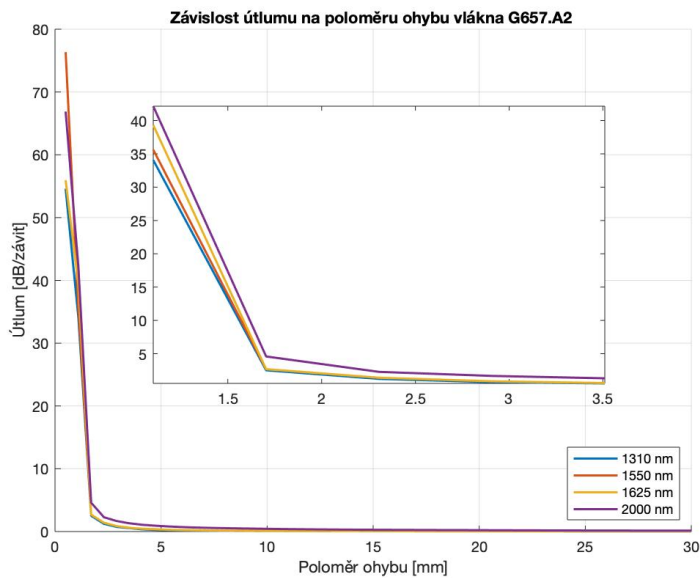
Ztráty makroohyby u vlákna G.657.A2 byly modelovány na stejných vlnových délkách jako u referenčního vlákna G.652.D. Výsledné hodnoty pro

zmíněné vlnové délky v závislosti na poloměru ohybu vlákna jsou zobrazeny na obrázku 5.4.

Při pohledu na přiblížení v obrázku 5.4a jsou vidět jen 3 vlnové délky. Vlnové délky 1550 nm a 1625 nm jsou blízko u sebe a jejich útlumy jsou téměř totožné, a proto se překrývají. K největším ztrátám dochází při namáhání vlákna do poloměru 5 mm, u větších poloměru jsou ztráty zanedbatelné.



(a) : Závislost poměru výkonů P2 a P1 na poloměru ohybu vlákna G.657.A2

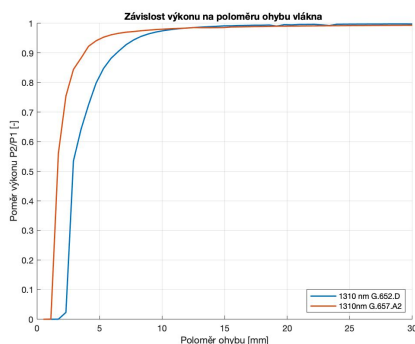


(b) : Útlum v závislosti na poloměru ohybu vlákna G.657.A2

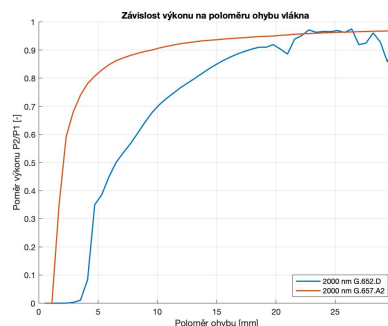
Obrázek 5.4: Simulace makroohybových ztrát u vlákna G.657.A2

5.3 Porovnání simulací G.652.D a G.657.A2

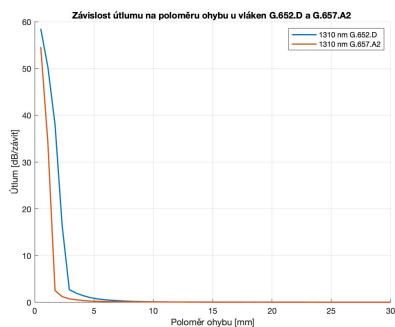
Na obrázku 5.5 je uvedeno porovnání vlivu ohybu na optická vlákna G.652.D a G.657.A2 na vlnových délkách 1310 nm a 2000 nm. Tyto dvě vlnové délky představují dva hraniční případy. Na vlnové délce 1310 nm se vyskytuje nejmenší útlum způsobený makroohybem a na vlnové délce 2000 nm mají makroohyby největší vliv na velikost útlumu. Grafy pro vlnové délky 1550 nm a 1625 nm jsou v příloze B. Z grafů vyplývá, že s narůstající vlnovou délkou se zvyšuje rozdíl ve výsledném výkonu u vláken v rozmezí poloměrů od 5 mm do 15 mm. Ze simulací lze dojít k závěru, že změnou profilu indexu lomu u vlákna G.657.A2 dochází k robustnějšímu vedení vlny. Tím se stává vlákno odolnější na ohyb než vlákno G.652.D.



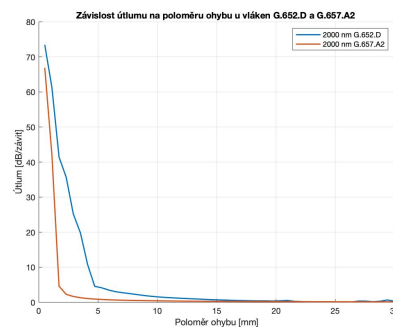
(a) : Porovnání poměru výkonu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$



(b) : Porovnání poměru výkonu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$



(c) : Porovnání útlumu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

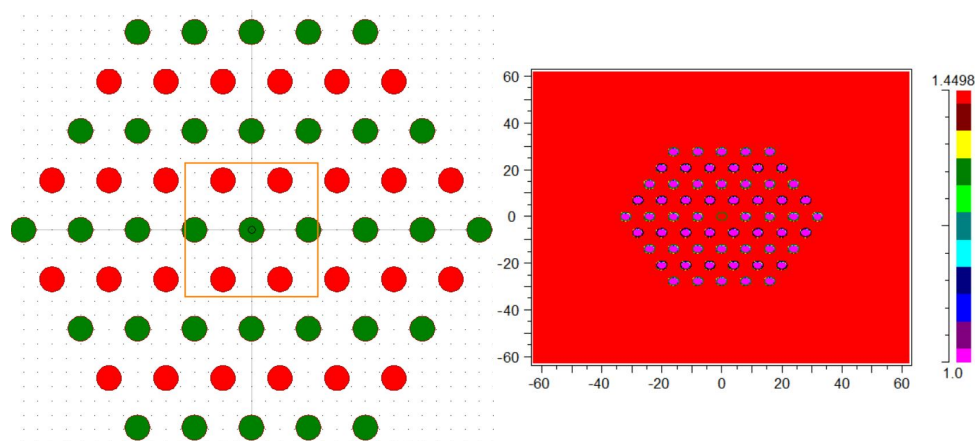


(d) : Porovnání útlumu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Obrázek 5.5: Závislost poměru výkonu a útlumu způsobený makroohybem u vláken G.652.D a G.657.A2 pro určité vlnové délky

5.4 Simulace mikrostrukturního vlákna ESM-12B

Pro simulace mikrostrukturního vlákna bylo zvoleno vlákno ESM-12B (Endlessly Single-Mode) od firmy NKT Photonics. Jedná se o mikrostrukturní vlákno s hexagonálním uspořádáním vzduchových otvorů, které je jednovidové přes oblast vlnových délek od 700 nm do 1700 nm. Vlákno je optimalizované tak, že pro zmíněnou oblast vlnových délek má nízké ztráty a velikost průměru vidového pole je v této oblasti nezávislá na vlnové délce. Vlákno má standardní průměr pláště 125 μm a průměr jádra je 12.2 μm . Průměr mikrostruktur je 3.5 μm až 4 μm a jejich rozteč je $\Lambda=8 \mu\text{m}$.



Obrázek 5.6: Vlákno ESM-12B a jeho index lomu pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

U mikrostrukturního vlákna byl sledován průměr vidového pole (MFD). Průměr vidového pole byl simulován na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 2000 nm. Podle datasheetu od výrobce vlákna je velikost MFD rovna $10 \pm 1 \mu\text{m}$. Výsledné hodnoty MFD lze najít v tabulce 3.6. Z tabulky vyplývá, že simulované vlákno tuto hodnotu splňuje. Lze tedy dojít k závěru, že MFD se mění s vlnovou délkou minimálně, a proto u mikrostruktury nejsou makrohybové ztráty závislé na vlnové délce. Simulace ohybů vlákna ESM-12B nebyla realizována z důvodu limitace simulačního software.

Tabulka 5.3: Nasimulovaný průměr vidového pole u vlákna ESM-12B

Vlnová délka [nm]	MFD [μm]
1310	11.21
1550	11.05
2000	10.92

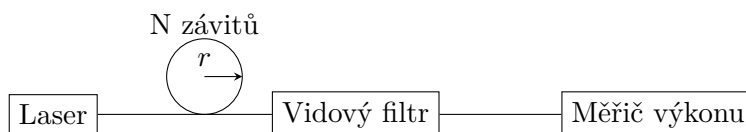
Kapitola 6

Měření ztrát makroohyby

6.1 Návrh měřícího pracoviště

Pro monitorování výkonu (ztrát) byla vybrána měřící aparatura se stabilním optickým zdrojem viz sekce 4.2. Tento způsob monitorování výkonu byl vybrán z důvodu toho, že není potřeba dvou vláken (není potřeba referenčního a testovaného vlákna).

Útlum způsobený makroohybem byl měřen pomocí metody navinutí vlákna (Fibre winding) dle doporučení ITU-G650.1 [6]. Makroohyb byl změřen pro vzorky s úplným navinutím 360° pro N vinutí za sebou. Vlákna byla navíjena na válce o předem definovaných poloměrech. Schéma pracoviště je na obrázku 6.1. V návrhu zapojení byl za ohybem vlákna přiřazený vidový filtr, kdyby došlo vlivem ohybu k vytvoření vyšších vidů. Pokud by k takovéto situaci došlo, byl by naměřen výkon dominantního vidu i výkon vyšších vidů a výsledná hodnota výkonu by byla větší.



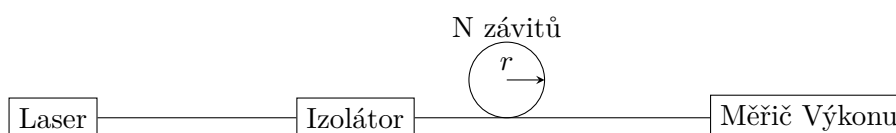
Obrázek 6.1: Měřící soustava pro N závitů na vlákně

Pro měření výkonu na konci vlákna byl použit měřič výkonu PM100D od firmy Thorlabs. U pilotních měření byl naměřený útlum s využitím vidového filtru totožný jako naměřené hodnoty útlumu bez použití vidového filtru. Schéma pracoviště bylo proto upraveno a vidový filtr byl pro další měření odstraněn viz obrázek 6.2. Při měření na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm byla část vláken odvinuta z cívky o délce 1000 m.



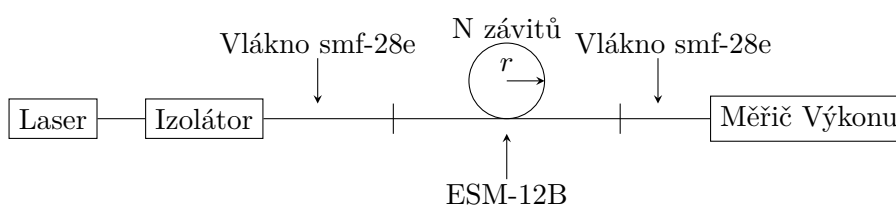
Obrázek 6.2: Schéma pro měření ohybu bez vidového filtru

Pro měření na vlnové délce 2000 nm, bylo nutné upravit schéma pracoviště a přidat před vlákno izolátor viz 6.3. Izolátor byl přidán, kvůli zabránění zpětného odrazu signálu do zdroje. Izolátor byl použit také kvůli vyrovnání velikostí MFD vláken, protože vlákno vedoucí z laseru má širší MFD než měřené vlákno splňující standard G.652.D. Dále bylo nutné při měření na vlnové délce 2000 nm použít kratší (2 m) vlákna, protože útlum vláken dlouhých 1000 m byl příliš velký a na konci nebyl detekován žádný výkon.



Obrázek 6.3: Schéma pro měření ohybu na $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Při pilotním měření mikrostrukturního vlákna docházelo k fluktuaci naměřené hodnoty útlumu. Bylo to z důvodu toho, že vlákno ESM-12B má dva rovné konektory (konce). Signál se ve vlákne odrazil od těchto konců a vznikl tím rezonátor. Tento nežádoucí jev byl odstraněn přidáním dvou vláken SMF-28e před a za mikrostrukturní vlákno ESM-12B. Proto bylo schéma zapojení pro měření ESM-12B vlákna upraveno, viz 6.4.



Obrázek 6.4: Schéma pro měření ohybu u vlákna ESM-12B

6.2 Zpracování naměřených výsledků

6.2.1 Nejistota měření

Měření útlumu způsobeného makroohybem je zatíženo určitou nepřesností, kterou může způsobit různé negativní vlivy, například náhodná chyba měření, chyba měřícího přístroje atd. Výsledná hodnota se tak pohybuje v určitém pravděpodobnostním rozsahu. Pro určení toho rozsahu se počítají nejistoty měření. Nejistoty jsou typu A a typu B, spojením těchto dvou nejistot získáme

kombinovanou nejistotu C. Nejistota typu A je stanovena z výsledků opakovaných měření pomocí statistické analýzy z naměřených hodnot. Nejistoty typu A lze vypočítat z rovnice 6.2. Standardní nejistota typu B pochází od různých zdrojů, jejichž hodnoty nezávisí na počtu opakování měření. Jedná se o odhad na základě dostupných informací a zkušeností, například z údaje výrobce měřícího přístroje, údaje získaného při kalibraci nebo z certifikátu. Výslednou nejistotu typu B lze vypočítat z rovnice 6.3, kde Δ_X je chyba přístroje. Výslednou nejistotu měření typu C získáme z rovnice 6.4 [5].

$$\bar{X}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6.1)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{x,i} - \bar{X}_x)^2} \quad (6.2)$$

$$u_B = \frac{\Delta_x}{\sqrt{3}} \quad (6.3)$$

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (6.4)$$

6.3 Měření ztrát makroohyby u G.652.D

Vlákno G.652.D bylo měřeno na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 2000 nm. Při měření makroohybových ztrát bylo vlákno navinuto na válce o poloměrech 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm a 30 mm. Maximální útlum způsobený makroohybem pro vlákno G.652.D je definovaný v doporučení ITU-T G.652 pouze pro poloměr 30 mm o 100 závitů na hodnotu 0.1 dB. Tato hodnota útlumu je tak malá, že při měření vzniká chyba měření v řádu setin až desetin dB a výsledné hodnoty jsou pak nepřesné. Měření útlumu vlákna G.652.D bylo tedy zaměřeno na menší poloměry z důvodu korektnějšímu porovnání s vláknem G.657.A2. Pro poloměr 15 mm je naměřen útlum pro 10 závitů a na zbylých poloměrech byla měřena ztráta ohybem pro jeden závit. Schéma pracoviště je zobrazeno na obrázku 6.2.

Výsledné naměřené hodnoty včetně nejistot měření pro výše zmíněné vlnové délky jsou zobrazeny v tabulkách 6.1, 6.2, 6.3¹. Při měření nízkých výkonů od 0.1 dB do 0.01 dB vzniká velká nejistota měření, protože výkon je měřen v řádech setin. Z naměřených hodnot je patrné, že citlivost vlákna na makroohybové ztráty narůstá se zvyšující se vlnovou délkou. Nejmenší hodnoty útlumu jsou naměřené pro vlnovou délku 1310 nm, kde vlákno má nejmenší MFD. Pro porovnání útlum na vlnové délce 1310 nm pro poloměr 5 mm byl naměřen 0.9590 dB ± 0.0632 dB. Na vlnové délce 1550 nm pro stejný poloměr byly ztráty makroohybem 8.4480 dB ± 0.2230 dB. Pro 2000 nm na stejném poloměru byly ztráty mimo rozsah měřiče výkonu. První hodnotu

¹NA - naměřená hodnota útlumu byla mimo možný rozsah měřiče výkonu

útlumu, kterou byl schopný přístroj na vlnové délce 2000 nm změřit, byla $8.5270 \text{ dB} \pm 0.2110 \text{ dB}$ pro poloměr 10 mm. Naměřené hodnoty tedy potvrzují teoretické a simulační předpoklady.

Měřené vlákno bylo vlákno od výrobce NBG one light, jenž má definovanou pouze jednu hodnotu pro velikost útlumu způsobeným makroohybem na vlnové délce 1625 nm. Hodnota útlumu je stanovena na 0.1 dB o poloměru 30 mm při 100 závitech [14].

Pro porovnání naměřených hodnot s dalším výrobcem vlákna G.652.D je možné zmínit vlákno SMF-28 od firmy Corning. Výrobce definuje pro vlákno hodnoty útlumu pro více poloměrů ohybu. První stanovená hodnota nesmí překročit velikost útlumu 0.50 dB pro ohyb o poloměru 10 mm. Druhá uvedená hodnota útlumu je při ohybu o poloměru 15 mm a 10-ti závitech, která nesmí překročit hodnotu 0.05 dB. Poslední definovaná hodnota nesmí přesáhnout útlum 0.01 dB pro poloměr 25 mm od 100 závitech Tyto hodnoty jsou definované pro vlnovou délku 1550 nm [2].

První stanovená hodnota útlumu od výrobce pro poloměr 10 mm je větší než naměřená hodnota útlumu 0.132 dB. Vlákno tedy splňuje požadované parametry od výrobce pro tento poloměr ohybu. Ztráta makroohybem o poloměru 15 mm s 10-ti závity byla změřena o velikosti 0.07 dB, což je o 0.02 dB větší hodnota než je definovaná od výrobce. V tomto případě jde měření v řádech setin dB. Takové měření je velmi nepřesné a vyskytuje se zde nejistota měření $\pm 0.0321 \text{ dB}$. To má za důsledek, že změřená hodnota se může pohybovat v rozmezí od 0.0421 dB do 0.1021 dB.

Tabulka 6.1: Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.9590 ± 0.0632
7.5	0.0500 ± 0.0307
10	0
15	0
30	0

Tabulka 6.2: Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

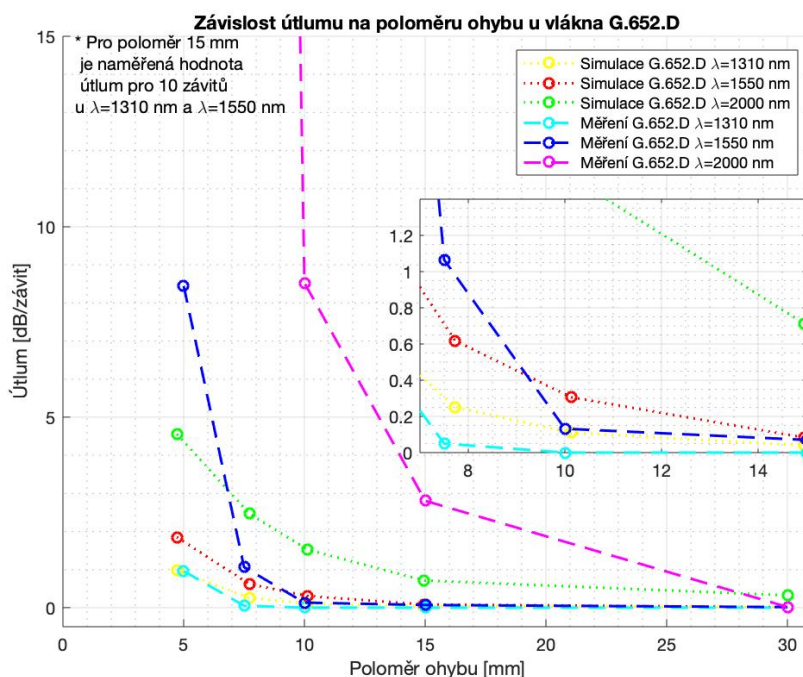
Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	8.4480 ± 0.2230
7.5	1.0650 ± 0.0848
10	0.1320 ± 0.0453
15	0.0700 ± 0.0321
30	0

Tabulka 6.3: Výsledný útlum pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	NA
7.5	NA
10	8.5270 ± 0.2110
15	2.8050 ± 0.0749
30	0.0170 ± 0.0296

Grafické porovnání simulací a naměřených dat na výše zmíněných vlnových délkách pro vlákno G.652.D je vyneseno do grafu v obrázku 6.5. Naměřené hodnoty útlumu na 1310 nm odpovídají provedeným simulacím vlákna G.652.D. U vlnové délky 1550 nm vidíme rozdíl vůči simulacím pouze u poloměru 5 mm.

Pro větší přehlednost obrázku 6.5 je část grafu zvětšená a to od poloměru ohybu 7.5 mm do 15 mm. Na vlnové délce 2000 nm je největší útlum. Velikost stopy pole je na této vlnové délce výrazně větší, jak průměr jádra a tím je způsoben výrazný pokles výkonu. Při měření bylo vlákno velice náchylné na jakýkoliv pohyb, a proto byly konektory na konci vlákna uchyceny, aby se částečně zamezilo nechtěnému pohybu a tím se nezvyšoval naměřený útlum. Graf na obrázku 6.5 je oříznutý na hodnotu útlumu 15 dB, aby zvýraznil, že hodnoty naměřené na 5 mm a 7.5 mm byly tak vysoké, že je nebylo možné změřit.

**Obrázek 6.5:** Porovnání velikosti útlumu vlákna G.652.D na $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ a $\lambda = 2000 \text{ nm}$

6.4 Měření ztrát makroohyby u G.657.A2

Vlákno G.657.A2 bylo měřeno na stejných vlnových délkách a namáháno na ohyby o stejných poloměrech jako vlákno G.652.D. Pro měření ztrát na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm bylo vlákno navinuté na cívce a část byla odvinuta z cívky, aby mohly být vytvářeny makroohyby na vlákně. Celková délka vlákna byla 944 m. Při měření ztrát na vlnové délce 2000 nm bylo nutné použít kratší vlákno (2 m), protože na zmíněné vlnové délce mělo vysoký útlum.

Ztráty makroohybem u G.657.A2 jsou definovány v doporučení ITU-T G.657 pro poloměry ohybu 7.5 mm, 10 mm a 15 mm (pro 10 závitů). Tyto hodnoty útlumu jsou vypsány v tabulce 3.1. Změřená velikost útlumu při poloměru ohybu 7.5 mm byla 0.166 dB, což je o 0.334 dB méně než stanovená hodnota od ITU. U poloměru ohybu 10 mm byla naměřena ztráta 0.070 dB. Maximální možný stanovený útlum od ITU je 0.1 dB. Změřená hodnota u vlákna G.657.A2 byla od 0.030 dB menší. Poslední definovaná ztráta je pro poloměr 15 mm o 10 závitech. Tuto hodnotu stanovuje ITU na 0.030 dB. Velikost útlumu pro tento poloměr byla naměřena o hodnotě 0.015 dB. Tato získaná hodnota útlumu není relevantní, protože nejistota měření (± 0.030 dB) vyšla větší jak změřená hodnota. Při porovnání s naměřenými hodnotami tedy vychází, že vlákno definované hodnoty splňuje.

Měřené vlákno bylo od výrobce OFS [19]. Výrobce měřeného vlákna stanovuje stejné hodnoty pro makroohybové ztráty jako jsou definovány v doporučení od ITU-T G.657.

Výrobce vlákna G.657.A2 Sterlite Technologies udává velikost útlumu pro poloměr 15 mm (10 závitů) menší nebo roven 0.03 dB, u poloměru 10 mm útlum menší nebo roven 0.10 dB a poslední stanovenou hodnotu útlumu pro poloměru 7.5 mm výrobce definoval menší nebo rovnu 0.20 dB [33]. Všechny předepsané hodnoty měřené vlákno splňuje.

Tabulka 6.4: Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310$ nm

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.087 ± 0.030
7.5	0
10	0
15	0
30	0

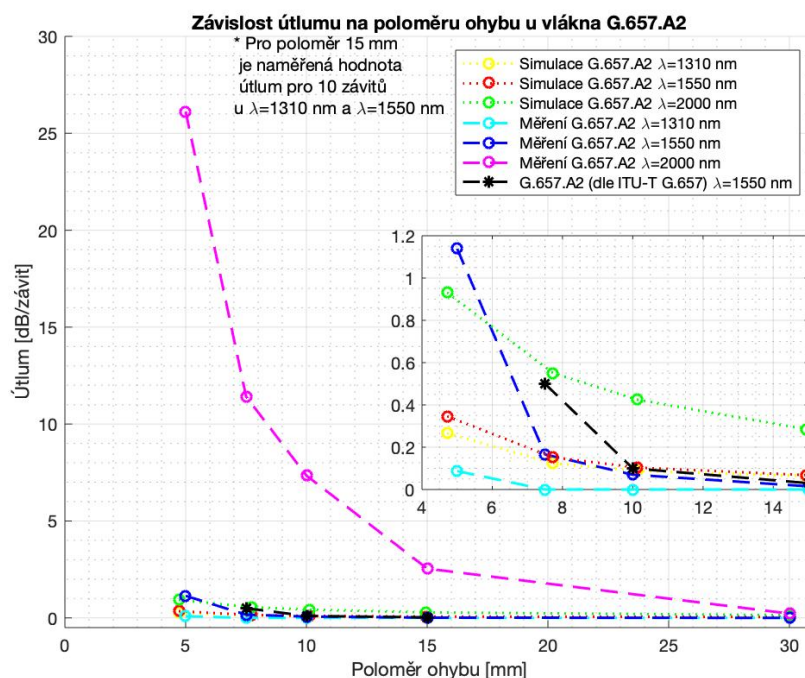
Tabulka 6.5: Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550$ nm

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	1.1390 ± 0.1240
7.5	0.1660 ± 0.0358
10	0.0700 ± 0.0304
15	0.0150 ± 0.0301
30	0

Tabulka 6.6: Výsledný útlum pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	26.1180 ± 1.0720
7.5	11.4230 ± 0.4290
10	7.3420 ± 0.1360
15	2.5430 ± 0.1750
30	0.2210 ± 0.0386

Na obrázku 6.6 jsou vyneseny naměřené a simulované hodnoty útlumu na všech měřených a simulovaných vlnových délkách. Simulace odpovídají naměřeným datům. Pouze vlnová délka 2000 nm je odlišná od nasimulovaných hodnot. Na této vlnové délce rapidně stoupá útlum vlákna. Tato rozdílnost je způsobená stejnými faktory jako u vlákna G.652.D.

**Obrázek 6.6:** Porovnání velikosti útlumu vlákna G.657.A2 na $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ a $\lambda = 2000 \text{ nm}$

6.5 Měření ztrát makroohyby u ESM-12B

Měřené mikrostrukturální vlákno bylo ESM-12B (Endlessly Single-Mode) od firmy NKT Photonics. Průměr jádra vlákna je $12.6 \mu\text{m}$, průměr otvorů je $3.6 \mu\text{m}$ a vzdálenost mezi otvory je $4.6 \mu\text{m}$. Výsledné změřené hodnoty útlumu jsou vypsány v tabulkách 6.7, 6.8 a 6.9. Změřená data jsou vynesena do grafu v obrázku 6.7. Velikost útlumu u mikrostrukturálních vláken se minimálně zvyšuje s poloměrem ohybu. Tento minimální nárůst útlumu je díky tomu, že nebyl překročen kritický poloměr ohybu. V sekci 3.1.5 bylo řečeno, že velikost kritického poloměru ohybu závisí na vzdálenosti mezi otvory ve vlákne. V případě měřeného vlákna ESM-12B je kritický poloměr přibližně roven $R_c \sim \frac{\Lambda^3}{\lambda^2}$ [10]. Kritický poloměr ohybu nebyl překročen, a proto jsou hodnoty útlumu téměř nulové.

Tabulka 6.7: Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	1.2460 ± 0.1030
7.5	0.3220 ± 0.0566
10	0.0980 ± 0.0341
15	0.0560 ± 0.0308
30	0 ± 0

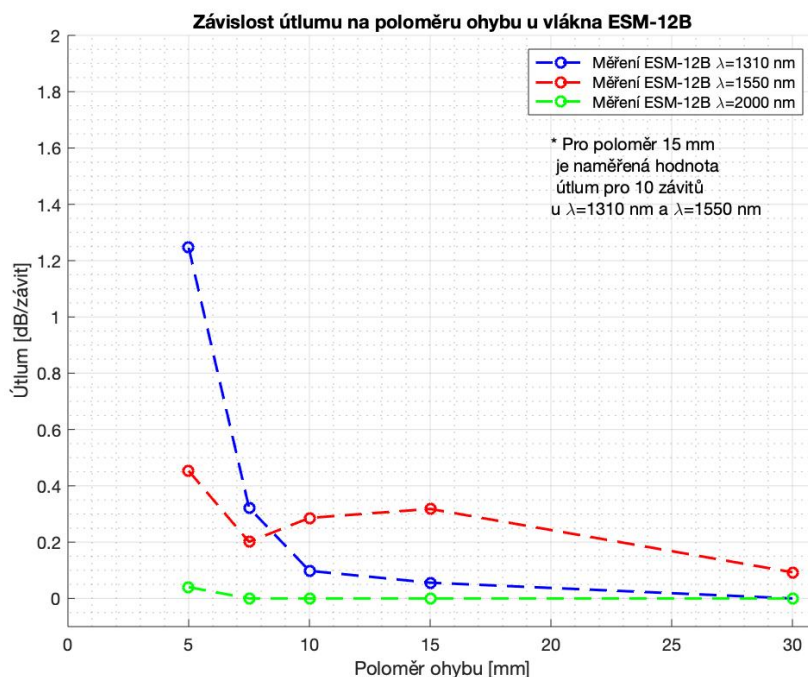
Tabulka 6.8: Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.4530 ± 0.1029
7.5	0.2010 ± 0.0346
10	0.2860 ± 0.0308
15	0.0318 ± 0.0387
30	0.0930 ± 0.0433

Tabulka 6.9: Výsledný útlum pro vlákno ESM-12B pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.0400 ± 0.0307
7.5	0 ± 0
10	0 ± 0
15	0 ± 0
30	0 ± 0

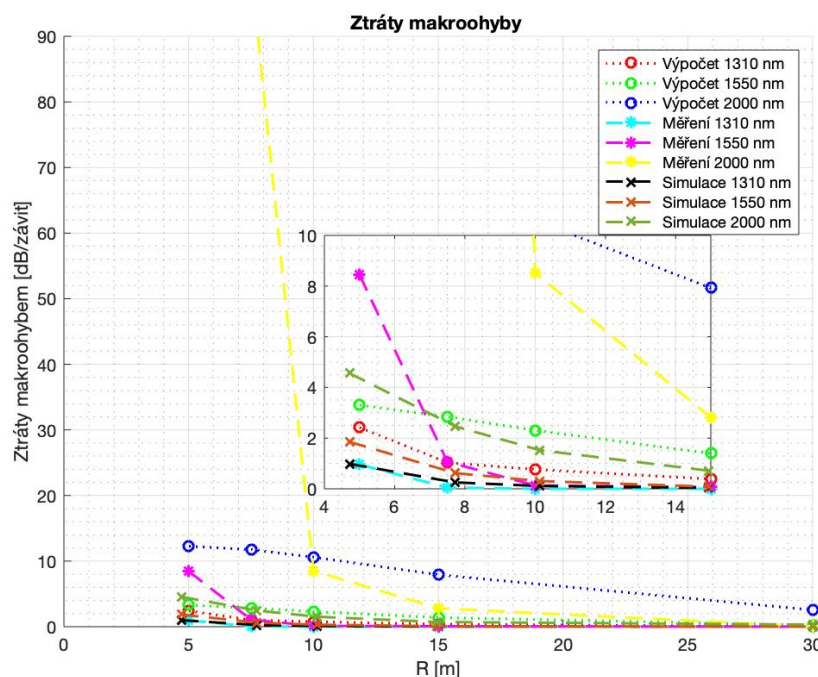
Z grafu vyplývá, že velikost útlumu způsobeného makroohybem u mikrostrukturního vlákna není závislá na vlnové délce. Nezávislost na vlnové délce je způsobena tím, že princip vedení paprsku v mikrostrukturním optickém vlákne je založený na jiném principu než u jednovidových vláken. Využívá principu modifikovaného totálního odrazu zmíněného v sekci 3.1.4.



Obrázek 6.7: Porovnání velikosti útlumu vlákna ESM-12B na $\lambda = 1310$ nm, $\lambda = 1550$ nm a $\lambda = 2000$ nm

6.6 Porovnání naměřených dat s teoretickými a simulačními podklady

Porovnání výpočtů, simulací a naměřených dat u vlákna G.652.D je graficky znázorněno na obrázku 6.8. Na vlnové délce 1310 nm lze vidět rozdíl 1.46 dB mezi měřením a výpočtem u poloměru 5 mm. U větších poloměrů se velikost rozdílu mezi výpočty a naměřenými hodnotami snižuje. U vlnové délky 1550 nm jsou simulace také přesnější. V porovnání výpočtu a simulace na vlnové délce 2000 nm byl výpočet pro poloměr ohybu 10 mm přesnější než simulace vlákna G.652.D. Z grafu můžeme dojít k závěru, že simulační program BeamPROP používá jiný vzorec pro výpočet makroohybu. Výpočet používaný v simulacích je přesnější než výpočet pro makroohyb definovaný Dietrichem Marcuse [29].

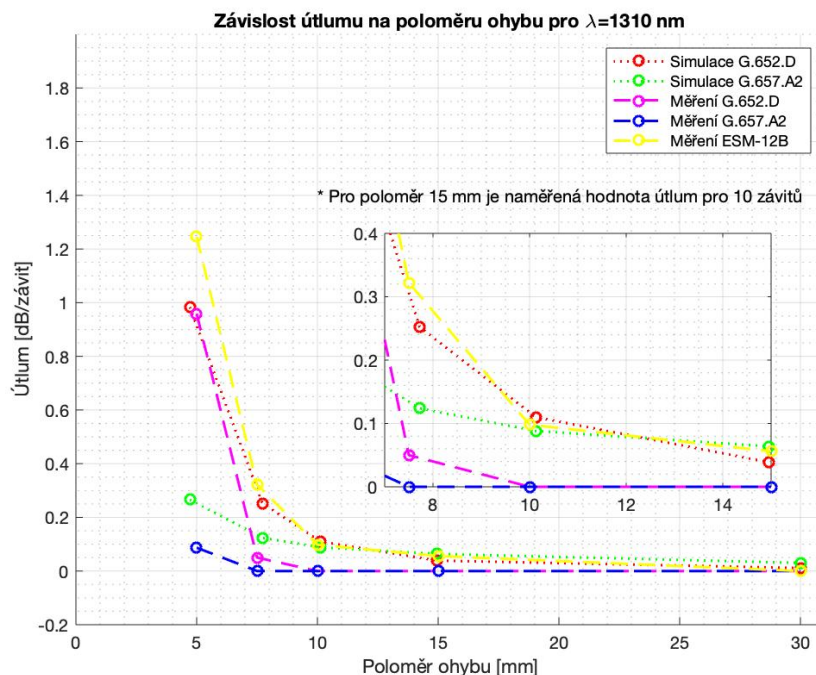


Obrázek 6.8: Porovnání vypočtených, nasimulovaných a změřených hodnot útlumu pro vlákno G.652.D

Porovnání útlumů vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B je zobrazeno podle vlnových délek. Na obrázcích 6.9, 6.10, 6.11 jsou zobrazeny útlumy vláken na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 2000 nm.

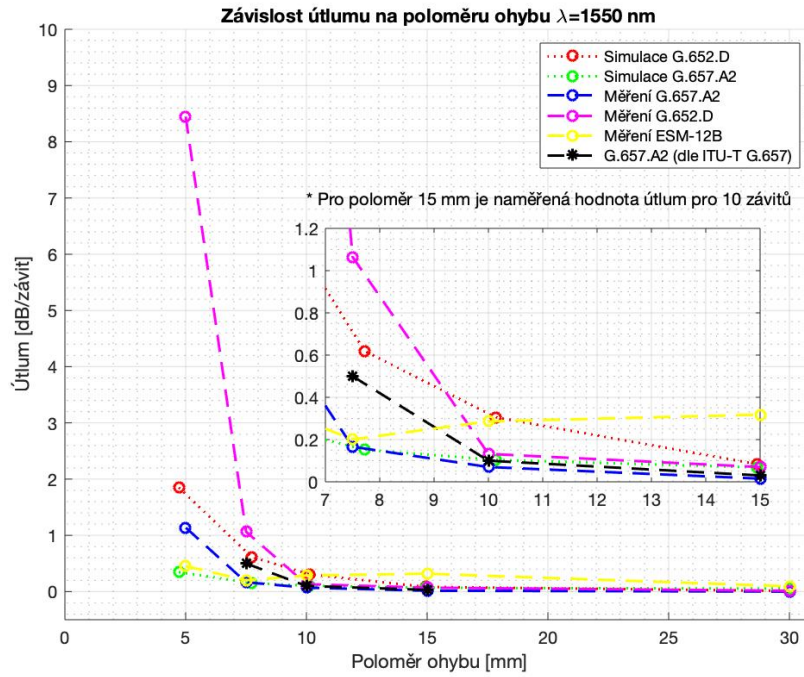
Útlumy měřených vláken na vlnové délce 1310 nm jsou relativně malé od 0 dB do 1.246 dB, viz obrázek 6.9. Největší podobnost simulací a měření u vlákna G.652.D je při poloměru 5 mm, kde hodnota simulace byla 0.9837 dB a měření 0.959 dB. Na poloměru 7.5 mm se simulace liší o 0.2 dB. Na ostatních poloměrech byl naměřený útlum nulový.

Na 1310 nm byl pro vlákno G.657.A2 naměřen pouze útlum na poloměru 5 mm. Hodnota naměřeného útlumu byla 0.087 dB a simulace měla hodnotu 0.2660 dB. Jak bylo zmíněno dříve v sekci 6.3, tak při měření takto malých útlumů vznikají velké nejistoty měření. Na zbylých poloměrech byly ztráty ohybem nulové. V porovnání s vlákem G.652.D mělo vlákno G.657.A2 nepatrně menší útlum na všech poloměrech ohybu. Vlákno ESM-12B mělo srovnatelný útlum makroohyby na všech poloměrech jako vlákno G.652.D.

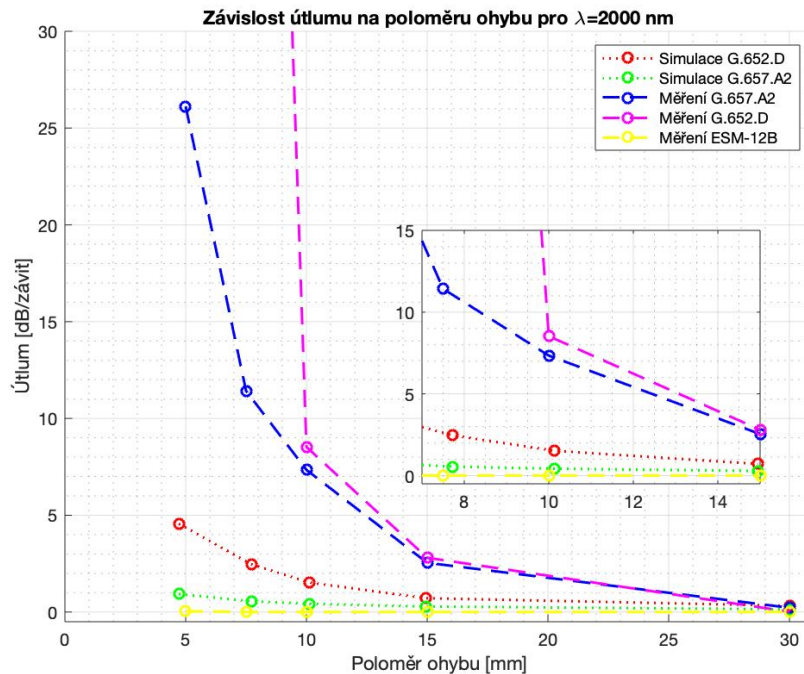


Obrázek 6.9: Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 1310$ nm

Na vlnové délce 1550 nm u vlákna G.652.D byla největší diference mezi simulacemi a měřením u poloměru 5 mm, rozdíl činil přes 6 dB. U zbytku simulovaných a naměřených hodnot byla maximální odchylka 0.6 dB. Naměřené a simulované hodnoty pro vlákno G.657.A2 se v nejhorších případech od poloměru 7.5 mm do 30 mm liší o 0.6 dB v případě 5 mm se simulace liší o 0.8 dB. Simulace tedy odpovídají reálným hodnotám a vlákno splňuje standard ITU-G.657 jak v simulacích tak v měření. Největší rozdíly útlumu mezi vlákny G.652.D a G.657.A2 byly na poloměrech 5 mm a 7,5 mm. U poloměru 5 mm byl rozdíl přes 7 dB. Vlákno ESM-12B mělo srovnatelný útlum makroohyby na všech poloměrech jako vlákno G.657.A1.



Obrázek 6.10: Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 1550$ nm



Obrázek 6.11: Porovnání velikosti útlumu vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B na $\lambda = 2000$ nm

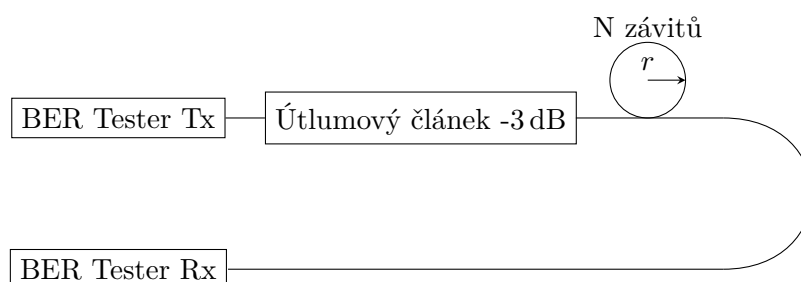
Při malých poloměrech se na vlnové délce 2000 nm simulace vlákna G.652.D výrazně liší od naměřených hodnot. Útlumy makroohybem u poloměřů 5 mm a 7.5 mm byly mimo rozsah měřiče výkonu. Na poloměrech 5 mm a 7.5 mm mělo vlákno G657.A2 výrazně menší útlum oproti G.652.D. Rozdíl útlumů při poloměrech ohybu 10 mm až 30 mm dosahoval maximální hodnoty 1.2 dB. Nejmenší útlum ohybem mělo mikrostrukturní vlákno ESM-12B, protože nebyl překročen kritický poloměr ohybu, jehož hodnota byla 120.4 μm .

Kapitola 7

Vliv ohybů na vlnové délce 1550/2000 nm na přenosové vlastnosti optického systému

7.1 Bit Error Rate test na vlnové délce 1550 nm

Pro test vlivu ohybů na přenosové vlastnosti optického systému na vlnové délce 1550 nm, byl vybrán jednoduchý optický systém, který se skládal z BER (BER - Bit Error Rate) testeru, útlumového článku a optického vlákna. Schéma zapojení měřícího pracoviště je zobrazeno na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Zapojení pracoviště při měření bitové chybovosti v závislosti na ohybu vlákna,
Tx - vysílací část, Rx - přijímací část

Bitová chybovost byla měřena na přístroji VePAL TX300e od firmy VeEX. Pomocí TX300e byl realizovaný a analyzovaný 10 Gbit/s on-off keying datový formát. Do schéma zapojení byl přidán útlumový článek, aby se snížila úroveň výkonu vzhledem k limitaci detektoru BER testeru.

Při BER testu bylo vlákno navíjeno na válce. Na každém válci byl vytvořen jeden závit s předem definovaným poloměrem. Jednalo se o poloměry 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm a 30 m. BER test trval 10 sekund a samotné měření bylo 10krát zopakováno. V tabulce 7.1 jsou vidět výsledné hodnoty naměřené při ohybu vlákna 5 mm. U ostatních poloměrů nebyla zaznamenána vyšší hodnota jak 10^{-9} a BER tester tedy ukazoval nulovou chybovost. Při testování vlivu ohybu na systém u vláken G.657.A2 a ESM-12B nebyla u výše zmíněných

poloměru zaznamenána žádná chybovost.

Tabulka 7.1: Naměřené hodnoty BER v závislosti na ohybu vlákna G.652.D v optickém systému

Poloměr [mm]	5
Měření	BER
1	1.699626e-9
2	8.485561e-9
3	6.272779e-9
4	9.284287e-9
5	6.763069e-9
6	9.606204e-9
7	8.485632e-9
8	9.543921e-9
9	4.623186e-9
10	5.342415e-9

Z výsledných měření lze dojít k závěru, že při ohybu o poloměru 5 mm u vlákna G.652.D dochází k minimální chybovosti. U větších poloměru nedochází k bitové chybovosti a ohyb vlákna nemá na systém žádný vliv. Při testování vláken G.657.A2 a ESM-12B nedocházelo horšímu výsledku BER než 10^{-9} .

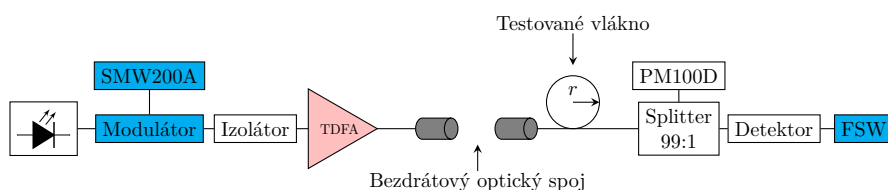
7.2 Přenos RF signálu přes optickou infrastrukturu na vlnové délce 2000 nm

FSO (FSO-Free Space Optics) je technologie založená na přenosu optického signálu volným prostorem. Oproti radiovým přenosům má FSO vyšší přenosovou kapacitu, maximální bezpečnost díky vysoké směrovosti, je odolná vůči rušení a neovlivňuje další technologie. Spoj je typu point-to-point a je založený na přímé viditelnosti. Bezdrátový optický spoj je možné provozovat až na kilometrové vzdálenosti. Velký negativní vliv na bezdrátový optický spoj má počasí, především mlha. Při výkonové bilanci je tedy nutno počítat s výkonovou rezervou, aby se předešlo při zhoršení atmosferických podmínek. Přenos dat je realizován pomocí vlnových délek 1550 nm nebo 780 nm až 850 nm. Vysílač používá jako zdroj signálu laser nebo infračervenou elektroluminiscenční diodu (LED dioda). Pro zachycení světelného paprsku používá přijímač fotodiodu typu PIN nebo lavinovou fotodiodu.

Makroohybové ztráty u bezdrátového optického spoje mohou vznikat na optickém vlákne, které je mezi zdrojem a vysílačem a mezi přijímačem a detektorem signálu.

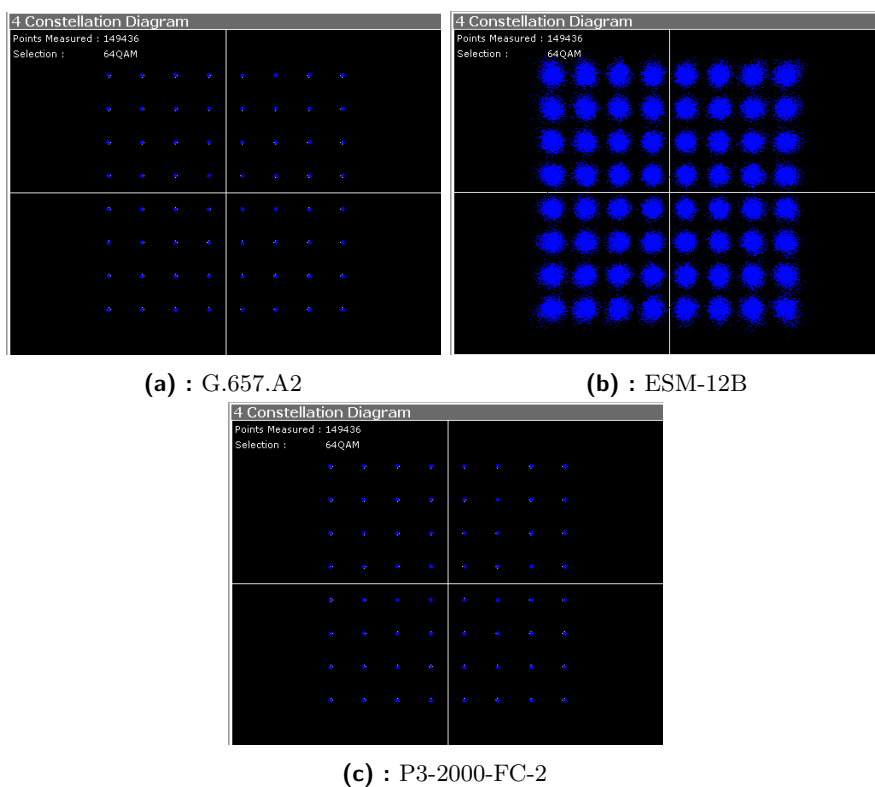
7.2.1 Měření FSO

Pro demonstraci makroohybových ztrát a jejich vlivu na optický systém byl realizován přenos radio-frekvenčního signálu na optické nosné pomocí vláknově-bezdrátového optického spoje na vlnové délce 2000 nm. Radio frekvenční signál o výkonu 8 dBm byl generován pomocí generátoru SMW200A od firmy Rohde & Schwarz, který poskytoval LTE rámce na 3.6GHz s šířkou pásma 20MHz. Přenášený signál byl formátu 64-QAM. RF signál byl namodulován na optickou nosnou pomocí Mach-Zehnderova modulátoru, MZM2000 - IxBlue model MX2000-LN-10. Za MZM2000 byl zapojen Thuliem dopovaný vláknový zesilovač (TDFA-Thulium-Doped Fiber Amplifier) s izolátorem pro zesílení signálu ústícího do kolimátoru s čočkou. Bezdrátový optický spoj byl realizován na vzdálenost 1 metru s přijímaným výkonem 1.90 dBm. Za přijímací čočkou bylo připojené vlákno testované na ohyb. Za testovaným vláknem byl zapojen optický splitter 99:1 pro rozdělení optického signálu do PM100D a do detektoru. PM100D (měřič výkonu) byl použit pro sledování optického výkonu. Přijatý signál byl zobrazen na RF spektrálním analyzáru Rohde & Schwarz model FSW. Pro analýzu přijatého signálu byl použit testovací model E-UTRA Test Model 3.1 (E-TM3.1) pro 64-QAM. Schéma zapojení systému je znázorněno na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Zapojení pracoviště FSO

Byly sledovány parametry EVM (EVM-Error vector magnitude), SNR (SNR-Signal to Noise Ratio) a konstelační diagram v závislosti na velikosti poloměru ohybu vláken. Namáhána na ohyb byla vlákna G.657.A2, P3-2000-FC-2 (speciální vlákno na 2000 nm) a mikrostrukturní vlákno ESM-12B. Tyto vlákna byla navinuta na definované poloměry 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm a 30 mm o jednom závit. Na obrázku 7.4b je zobrazena závislost SNR na poloměru ohybu vlákna G.657.A2. Z obrázku lze vyčíst, že SNR s narůstajícím poloměrem ohybu klesá. Při poloměru ohybu 5 mm přestal být systém funkční a na konstelačním diagramu nebylo možné vyčíst konstelační body 64-QAM modulace. Obrázek 7.3 znázorňuje konstelační diagramy 64-QAM modulace při použití vláken G.657.A2, ESM-12B a P3-2000-FC-2 bez ohybu.



Obrázek 7.3: Konstelační diagramy 64-QAM modulace

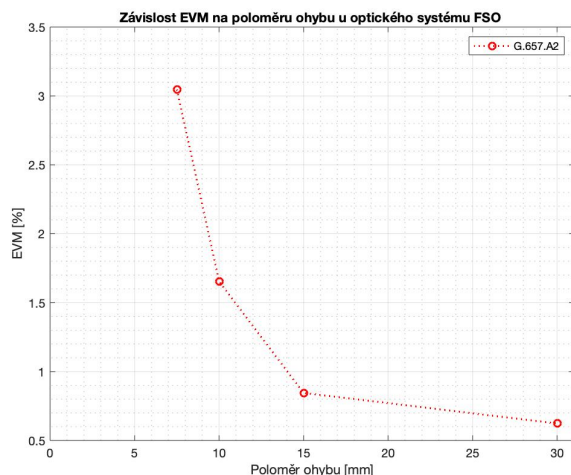
Na obrázku 7.4a je vidět závislost EVM na poloměru ohybu vlákna. Se zvyšujícím se poloměrem se hodnota EVM zvyšuje. Pro správnou funkčnost spoje je definovaná maximální hodnota EVM 9%. Vlákno G.657.A2 tuto hodnotu překročilo pouze při poloměru 5 mm. Způsobený útlum byl tak velký, že spoj přestal fungovat.

Tabulka 7.2: Výsledné EVM pro vlákno G.657.A2 v optickém systému FSO

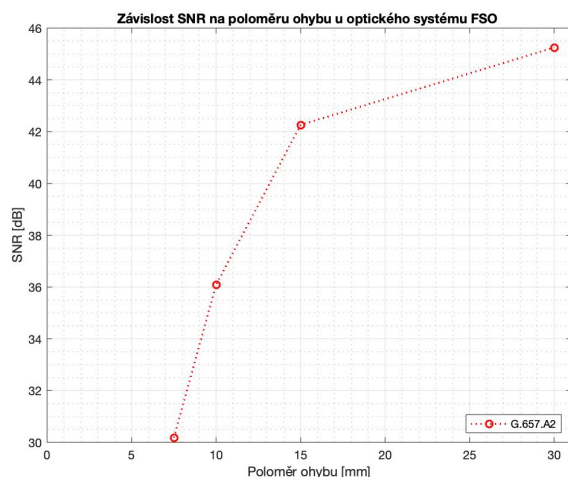
Poloměr[mm]	EVM[%]
5	NA
7.5	3.05 ± 0.90
10	1.65 ± 0.31
15	0.85 ± 0.03
30	0.62 ± 0.01

Tabulka 7.3: Výsledné SNR pro vlákno G.657.A2 v optickém systému FSO

Poloměr[mm]	SNR[dB]
5	NA
7.5	30.18 ± 3.31
10	36.09 ± 1.77
15	42.26 ± 0.45
30	45.35 ± 0.47



(a) : Závislost EVM na poloměru ohybu vlákna v optickém systému FSO



(b) : Závislost SNR na poloměru ohybu vlákna v optickém systému FSO

Obrázek 7.4: Závislost EVM a SNR na poloměru ohybu vlákna v optickém systému FSO

Při ohýbání vlákna P3-2000-FC-2 pod poloměry 30 mm do 7.5 mm se hodnoty EVM a SNR takřka neměnily. Při pokusu o vytvoření ohybu 5 mm bylo vlákno tak namáháno, až hrozilo jeho poškození. Hodnoty EVM a SNR při takovém ohybu se začaly rapidně měnit. Speciální vlákno (P3-2000-FC-2) na 2000 nm do 5 mm nevykazovalo žádné ztráty způsobené ohybem, od 5 mm bylo možné sledovat viditelné zhoršení a systém přestával být funkční.

Poslední testované vlákno bylo mikrostrukturální vlákno ESM-12B. Po zakonponování optického vlákna do systému, klesl optický výkon z -4.2 dBm na -15 dBm. Vlákno do systému tedy vneslo ztrátu 10.8 dB. Tato velikost útlumu je limitující pro správnou funkčnost FSO. Pro uplatnění toho vlákna

je nutné optimalizovat upevnění, to znamená navařit ho (napojit). Z hlediska ohybu je nejlepší mikrostrukturní vlákno. Při namáhání vlákna na ohyby pod poloměry 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm a 30 mm vykazovalo minimální ztráty, jak již bylo prezentováno v sekci 6.5 .

Kapitola 8

Závěr

Cílem diplomové práce bylo analyzovat vliv makroohybových ztrát optických vláken typu G.652, G.657 a mikrostrukturního optického vlákna na přenášený optický signál. K tomuto byl proveden teoretický rozbor, provedena simulační analýza daných optických vláken. Byly navrženy měřicí metodiky pro experimentální vyhodnocení vlivu ohybu na optická vlákna a na vláknové systémy v rozsahu vlnových délek 1310 nm až 2000 nm. V práci byla realizována studie použití konvenčního optického vlákna G.657.A2 na perspektivní vlnové délce 2000 nm v kombinaci s bezdrátovým optickým systémem.

V porovnání výsledných simulací bylo vlákno G.652.D náchylnější na ohyb než vlákno G.657.A2. Při porovnání útlumu způsobeného ohybem na nejmenším poloměru 5 mm lze vidět, že vlákno G.652.D má o 0.7 dB větší útlum na 1310 nm a o 3.6 dB větší útlum než vlákno G.657.A2 na vlnové délce 2000 nm.

Byla navržena měřicí pracoviště pro měření útlumu způsobeného makroohybem vláken G.652.D, G.657.A2 a ESM-12B. Měřená vlákna byla namotávána na válce o definovaných poloměrech 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm a 30 mm. Z výsledných měření lze dojít k závěru, že nejvíce odolné vlákno na ohyb bylo mikrostrukturní vlákno ESM-12B. Druhé nejvíce odolné vlákno na ohyb bylo G.657.A2. Měřené vlákno G.657.A2 splňovalo všechny maximální stanovené hodnoty útlumu způsobené makroohybem a byl tedy předepsaný standard dodržen. Nejméně odolné vlákno na makroohybové ztráty bylo dle očekávání vlákno G.652.D. Vlákno G.652.D lze použít za předpokladu, že nebude namáháno na ohyby menší jak 30 mm, pokud by tento předpoklad nebyl splněn, mělo by se použít vlákno odolné na ohyb G.657.A2.

V poslední části měření byly hodnoceny vlivy ohybu vláken na optické systémy na vlnových délkách 1550 nm a 2000 nm. Na 1550 nm byla sledována bitová chybovost v závislosti na poloměru ohybu vlákna. Z naměřených výsledků u vlákna G.652.D vyplynulo, že vliv ohybu o poloměru 5 mm na měřený systém byl minimální. Větší poloměry ohybu neměly na optický systém vliv. Při testování vlákna G.657.A2 a mikrostrukturního vlákna ESM-12B při poloměru ohybu od 5 mm do 30 mm nedocházelo k bitové chybovosti spoje větší než 10^{-9} .

Vliv makroohybových ztrát u vlákna na optický systém na vlnové délce

2000 nm byl demonstrován pomocí bezdrátového optického spoje. Byl realizován radiový přenos pomocí bezdrátového optického spoje. Sledované parametry byly EVM, SNR a konstelační diagram 64-QAM modulace. Testovaná vlákna na ohyb byla G.657.A2, P3-2000-FC-2 a mikrostrukturní vlákno ESM-12B.

Speciální vlákno na 2000 nm (P3-2000-FC-2) do poloměru 7.5 mm nevykazovalo žádné ohybové ztráty a hodnoty EVM a SNR se neměnily. Při ohybu vlákna o poloměru 5 mm bylo zaznamenáno viditelné zhoršení přenosových vlastností systému. Vlákno G.657.A2 překračovalo maximální stanovenou hodnotu EVM (9 %) pouze při poloměru ohybu 5 mm.

Z výsledných hodnot lze dojít k závěru, že vlákno G.657.A2 je možné použít jako náhradu za speciální vlákno na 2000 nm. Pro uplatnění mikrostrukturního vlákna by bylo nutné optimalizovat upevnění vlákna v systému, aby nedocházelo k velkým vneseným ztrátám do systému. Pokud by se tento problém vyřešil, mikrostrukturní vlákno by mělo lepší vlastnosti než vlákno G.657.A2. Nicméně mikrostrukturní vlákno je v současné době dražší než samotné vlákno na 2000 nm P3-2000-FC-2.



Literatura

- [1] O.V. Butov et al. *Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics*. [online].[vid. 20.06.2020]. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401802020874>.
- [2] Corning. *Corning SMF-28 Ultra Optical Fiber*. [online].[vid. 01.06.2020]. 2014. URL: <https://www.corning.com/optical-communications/in/en/home/products/fiber/optical-fiber-products/smf-28-ultra.html>.
- [3] Newport Corporation. *Highly Nonlinear Photonic Crystal Fibers*. [online].[vid. 26.07.2020]. 2020. URL: <https://www.newport.com/f/highly-nonlinear-photonic-crystal-fibers>.
- [4] Fibercore. *Mode Field Diameter (MFD)*. [online].[vid. 08.04.2020]. URL: <https://www.fibercore.com/expertise/fiberpaedia/mode-field-diameter-mfd>.
- [5] Vladimír Haasz. *Úvod, Přesnost měření*. [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, říj. 2016.
- [6] ITU-T. *G.650: Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.650.1-201803-I/en>.
- [7] ITU-T. *G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>.
- [8] ITU-T. *G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201611-I/en>.
- [9] ITU-T. *ITU-T G.657 Fibres: Bend-insensitive single-mode fibres for access networks and customer premises*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/0b/04/T0B040000542C01PDFE.pdf.
- [10] Russell P. S. J. *Photonic-Crystal Fibers*. ISSN: 1558-2213. IEEE, 2006.

- [11] Algorri JF et al. *Infiltrated Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications*. [online].[vid. 01.07.2020]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6308598/>.
- [12] Ken-ichi Kitayama. *Optical Code Division Multiple Access*. ISBN: 978-1-13-920691-4. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [13] Narendra Kumar a Bhuvneshwer Suthar. *Advances in Photonic Crystals and Devices*. ISBN: 978-1-138-55246-3. Taylor & Francis Group,LLC, 2019.
- [14] NBG one light. *G.652d*. [online].[vid. 01.06.2020]. URL: <https://www.nbg.tech/optical-fiber/#>.
- [15] D. Marcuse. *Light Transmission Optics*. LCCN: 73-180161. Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [16] Venkata Miriampally. *2D Optical Fiber Wave Guide Design for Multi Haul Applications*. [online].[vid. 08.05.2020]. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/332542610_2D_Optical_Fiber_Wave_Guide_Design_for_Multi_Haul_Applications.
- [17] Karel Novotný. *Optická komunikační technika*. ISBN: 978-80-01-01642-8. Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [18] Karel Novotný, Tomáš Martan a Jan Šístek. *Systémy pro optické komunikace*. ISBN: 978-80-01-02810-0. Vydavatelství ČVUT, 2007.
- [19] OFS. *AllWave FLEX+ Fiber - Zero Water Peak*. [online].[vid. 01.07.2020]. URL: <https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/documents/pdf/AllWave-FLEX-PLUS-144-web.pdf>.
- [20] Optiwave. *Fiber Loss Models*. [online].[vid. 08.06.2020]. URL: <https://optiwave.com/optifiber-manuals/optical-fiber-fiber-loss-models/>.
- [21] R. Paschotta. *Hollow-core Fibers*. [online].[vid. 07.04.2020]. URL: https://www.rp-photonics.com/hollow_core_fibers.html.
- [22] R. Paschotta. *Photonic Bandgap Fibers*. [online].[vid. 23.04.2020]. URL: https://www.rp-photonics.com/photonic_bandgap_fibers.html.
- [23] R. Paschotta. *Photonic crystal fibers*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: https://www.rp-photonics.com/photonic_crystal_fibers.html.
- [24] R. Paschotta. *Single-mode fibers*. [online].[vid. 07.02.2020]. URL: https://www.rp-photonics.com/single_mode_fibers.html.
- [25] F. Poli, A. Cucinotta a S. Selleri. *Photonic Crystal Fibers*. ISBN: 978-1-4020-6326-8. Springer, 2007.
- [26] Maurice O'Sullivan Rongqing Hui. *Fiber Optic Measurement Techniques*. ISBN: 978-0-12-373865-3. Academic Press, 2009.
- [27] Jun-ichi Sakai a Tatsuya Kimura. *Bending loss of propagation modes in arbitrary-index profile optical fibers*. [online].[vid. 07.04.2020]. 1978. URL: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-17-10-1499>.

- [28] John M. Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice (3rd Edition)*. ISBN: 978-0-13-032681-2. Ashford Colour Press Ltd, Gosport, 2009.
- [29] R. T. Schermer a J. H. Cole. *Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment*. [online].[vid. 07.04.2020]. 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4300920>.
- [30] A.W. Snyder a J. Love. *Optical Waveguide Theory*. ISBN: 978-0-4120-9950-2. Kluwer Academic Publishers, 1983.
- [31] Indian Standard. *Indian standard OPTICAL FIBRES – Part 1: Measurement methods and test procedures – Section 46: Monitoring of Changes in Optical Transmittance*. [online].[vid. 08.04.2020]. 2013. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.iec.60793.1.46.2001>.
- [32] Indian Standard. *Indian standard OPTICAL FIBRES – Part 1: Measurement methods and test procedures – Section 47: Macrobending Loss*. [online].[vid. 08.04.2020]. 2013. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.iec.60793.1.47.2009>.
- [33] Sterlite Tech. *Bend Insensitive*. [online].[vid. 20.05.2020]. URL: <https://www.stl.tech/connectivity-solution/optical-fibre/>.

Příloha A

Tabulky naměřených hodnot

Simulace

Tabulka A.1: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.9837
7.7	0.2521
10	0.1099
15	0.0389
30	0.0112

Tabulka A.2: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	1.8518
7.7	0.6188
10	0.3057
15	0.0835
30	0.0118

Tabulka A.3: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	4.5615
7.7	2.4657
10	1.5223
15	0.7136
30	0.3244

Tabulka A.4: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.2660
7.7	0.1238
10	0.0881
15	0.0639
30	0.0303

Tabulka A.5: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.3467
7.7	0.1521
10	0.1038
15	0.0680
30	0.0525

Tabulka A.6: Výsledný útlum simulací pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Poloměr [mm]	Výsledný útlum [dB]
5	0.9315
7.7	0.5509
10	0.4247
15	0.2851
30	0.1416

Měření

Tabulka A.7: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1310				
	5	7.5	10	15	30
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	0.91	0.04	0	0	0
2	1.09	0.03	0	0	0
3	0.98	0.06	0	0	0
4	0.93	0.06	0	0	0
5	0.91	0.05	0	0	0
6	0.98	0.06	0	0	0
7	0.99	0.05	0	0	0
8	0.90	0.06	0	0	0
9	0.96	0.05	0	0	0
10	0.94	0.04	0	0	0

Tabulka A.8: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1550				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	8.80	1.07	0.10	0.08	0
2	8.60	1.12	0.11	0.05	0
3	8.30	1.11	0.14	0.08	0
4	8.24	1.10	0.11	0.06	0
5	8.33	0.90	0.17	0.07	0
6	8.54	1.16	0.12	0.06	0
7	8.10	1.04	0.12	0.05	0
8	8.31	1.03	0.20	0.08	0
9	8.61	0.98	0.09	0.09	0
10	8.65	1.14	0.16	0.08	0

Tabulka A.9: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.652.D pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	2000				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	NA	NA	7.73	1.38	0.02
2	NA	NA	7.95	1.23	0.01
3	NA	NA	7.78	1.14	0.02
4	NA	NA	7.55	1.15	0.01
5	NA	NA	7.50	1.08	0.02
6	NA	NA	7.47	1.19	0.03
7	NA	NA	7.16	1.50	0.01
8	NA	NA	7.66	1.26	0.02
9	NA	NA	7.90	1.11	0.02
10	NA	NA	7.68	1.14	0.01

Tabulka A.10: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1310				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	0.10	0	0	0	0
2	0.08	0	0	0	0
3	0.08	0	0	0	0
4	0.08	0	0	0	0
5	0.10	0	0	0	0
6	0.09	0	0	0	0
7	0.08	0	0	0	0
8	0.08	0	0	0	0
9	0.08	0	0	0	0
10	0.09	0	0	0	0

Tabulka A.11: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1550				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	0.98	0.15	0.07	0.01	0
2	1.22	0.20	0.08	0.03	0
3	1.01	0.19	0.07	0.02	0
4	1.15	0.18	0.08	0.01	0
5	1.07	0.14	0.06	0.01	0
6	1.08	0.15	0.06	0.01	0
7	1.17	0.14	0.06	0.03	0
8	1.08	0.18	0.08	0.01	0
9	1.38	0.17	0.08	0.01	0
10	1.25	0.16	0.06	0.01	0

Tabulka A.12: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno G.657.A2 pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	2000				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	25.04	11.85	7.55	2.78	0.20
2	25.28	11.28	7.45	2.85	0.25
3	26.43	11.09	7.22	2.40	0.22
4	25.76	11.29	7.35	2.72	0.26
5	28.60	10.94	7.25	2.73	0.22
6	26.26	11.53	7.41	2.87	0.21
7	25.63	12.40	7.69	2.31	0.25
8	25.68	11.08	7.11	2.46	0.20
9	27.15	11.37	7.26	2.35	0.22
10	25.36	11.40	7.24	2.86	0.18

Tabulka A.13: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 1310 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1310				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	1.28	0.22	0.08	0.07	0
2	1.18	0.32	0.13	0.06	0
3	1.50	0.40	0.12	0.04	0
4	1.15	0.33	0.11	0.05	0
5	1.25	0.35	0.08	0.06	0
6	1.24	0.30	0.09	0.05	0
7	1.27	0.28	0.11	0.07	0
8	1.20	0.34	0.09	0.06	0
9	1.21	0.36	0.08	0.06	0
10	1.18	0.32	0.09	0.04	0

Tabulka A.14: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1550				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	0.36	0.23	0.28	0.32	0.12
2	0.38	0.18	0.27	0.29	0.14
3	0.55	0.20	0.27	0.32	0.15
4	0.51	0.19	0.30	0.33	0.08
5	0.57	0.21	0.29	0.34	0.07
6	0.46	0.22	0.29	0.30	0.06
7	0.32	0.17	0.28	0.32	0.08
8	0.40	0.19	0.29	0.33	0.09
9	0.38	0.20	0.29	0.36	0.08
10	0.60	0.22	0.30	0.27	0.06

Tabulka A.15: Naměřené hodnoty útlumu pro vlákno ESM12-B pro $\lambda = 2000 \text{ nm}$

Vlnová délka [nm]	1550				
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]	útlum [dB]
1	0.03	0	0	0	0
2	0.04	0	0	0	0
3	0.05	0	0	0	0
4	0.04	0	0	0	0
5	0.02	0	0	0	0
6	0.05	0	0	0	0
7	0.04	0	0	0	0
8	0.05	0	0	0	0
9	0.03	0	0	0	0
10	0.05	0	0	0	0

■ Merení FSO

Tabulka A.16: Naměřené hodnoty SNR v závislosti na ohybu vlákna v optickém systému

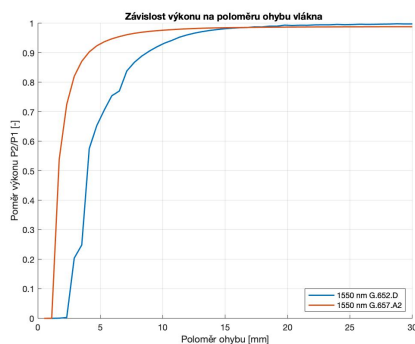
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
1	NA	34.30	35.40	42.10	45.50
2	NA	24.90	32.80	42.40	44.90
3	NA	26.30	35.90	41.50	45.70
4	NA	30.00	37.50	42.10	45.00
5	NA	32.20	37.00	42.60	45.50
6	NA	33.20	35.40	41.90	45.40
7	NA	26.90	33.80	43.00	44.80
8	NA	32.10	37.90	42.30	45.30
9	NA	33.20	38.10	41.90	44.40
10	NA	28.70	37.10	42.80	46.00

Tabulka A.17: Naměřené hodnoty EVM v závislosti na ohybu vlákna v optickém systému

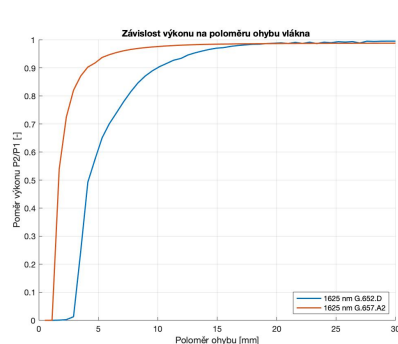
Poloměr [mm]	5	7.5	10	15	30
Měření	EVM [%]	EVM [%]	EVM [%]	EVM [%]	EVM [%]
1	NA	2.40	1.66	0.89	0.62
2	NA	4.09	2.23	0.80	0.63
3	NA	2.79	1.89	0.87	0.63
4	NA	2.35	1.30	0.84	0.62
5	NA	3.36	1.45	0.84	0.63
6	NA	2.24	1.71	0.84	0.62
7	NA	3.32	2.05	0.84	0.62
8	NA	2.64	1.37	0.87	0.62
9	NA	2.30	1.47	0.82	0.63
10	NA	4.98	1.41	0.84	0.61

Příloha B

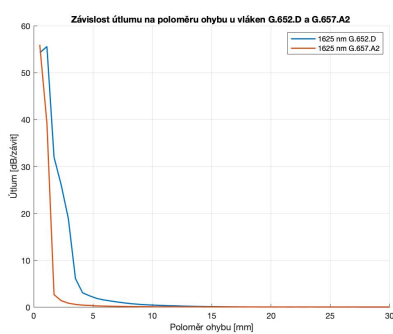
Grafy



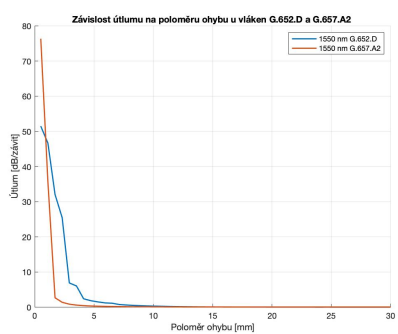
(a) : Porovnání poměru výkonu G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$



(b) : Porovnání poměru výkonu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1625 \text{ nm}$



(c) : Porovnání útlumu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1625 \text{ nm}$



(d) : Porovnání útlumu vláken G.652D a G.657.A2 pro $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Obrázek B.1: Závislost poměru výkonu a útlumu způsobený makroohybem u vláken G.652.D a G.657.A2 pro určité vlnové délky