

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Využití optických vláken s dutým jádrem v hybridních optických spojích

Jan Vocílka

Školitel: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vocílka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **491182**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití optických vláken s dutým jádrem v hybridních optických spojích

Název bakalářské práce anglicky:

Application of Hollow Core Optical Fibers in Hybrid Optical Links

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce bude teoretická rešerše, rozbor, simulace, návrh praktického řešení a experimentální ověření vazby z optického vlákna s dutým jádrem (hollow core fiber) do volného prostoru pro využití v hybridním optickém spoji. Pojmem hybridní optický spoj zde rozumíme kombinaci vláknově-optické části (fiber-optic) s částí bezdrátovou (free-space optics). Takovýto optický spoj bude přenášet de facto signál pouze vzduchem, ať už ve vlákně či volném prostoru a poskytne tak značné výhody v použitelných vlnových délkách, latenci, nízké nelinearitě a mnoha dalších aspektech.

V práci se zaměřte na tyto dílčí cíle:

- 1) Teoretický rozbor a rešerše tématu vláken s dutým jádrem
- 2) Možnosti vazby/napojení vláken s dutým jádrem pro free-space optics
- 3) Volba a charakterizace vhodného vlákna s dutým jádrem
- 4) Simulační studie a optimalizace vazby ze zvoleného vlákna do volného prostoru
- 5) Experimentální ověření vazby
- 6) Návrh a sestavení demonstračního optického spoje
- 7) Přenos dat, ověření funkce
- 8) Finální zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- [1] Poli, F., Cucinotta, A., Selleri, S., Photonic Crystal Fibers
- [2] O'Sullivan, Fiber Optic Measurement Techniques
- [3] Polletti F., Advances in Hollow Optical Fiber Technologies and Applications, OFC 2019, Th3E.1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Matěji Komančovi, Ph.D. za vedení bakalářského projektu. Jeho rady a připomínky mi byly velkým přínosem. Dále bych rád poděkoval členům optického týmu, jmenovitě: Ing. Ailing Zhong, Ing. Dmytru Suslovovi a Ing. Danielu Douskovi za trpělivost a pomoc v laboratoři.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 19.05.2022

Abstrakt

Cílem práce je návrh, simulace a realizace hybridního optického spoje pro vlnovou délku 1550 nm založeného na kolimátoru navázaném na optické vlákno s dutým jádrem. Práce se nejprve zaměřuje na přehled principů vedení vlny v optických vláknech s dutým jádrem, na zhodnocení jejich přenosových vlastností a na rešerši možných aplikací. Dále je v práci rozveden obecný teoretický popis, návrh a konstrukce hybridního optického spoje, který kombinuje část vláknově optickou s částí volnosvazkovou. V práci diskutují metody měření klíčových parametrů a prezentují simulační model kolimátoru na bázi optických vláken s dutým jádrem. Následně je hybridní optický spoj otestován z hlediska kvality datového přenosu. Závěr je věnován vyhodnocení měření a zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: optická vlákna s dutým jádrem, volnosvazková optika, kolimátor, planokonvexní čočka

Školitel: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Department of Electromagnetic Field,
Technická 1902/2,
166 27 Praha 6

Abstract

The main aims of the bachelor thesis are the design, simulation and realization of a hybrid optical link operating at the wavelength of 1550 nm. The link utilizes a collimator formed by a plano-convex lens coupled to a hollow-core fiber. The thesis first provides an overview of light guidance principles in hollow-core optical fibers, a description of transmission properties, and a survey of possible applications. The theoretical description, design and realization of the hybrid optical link combining fiber-optic part with free-space part are included. Measurement methods of selected parameters and simulations evaluating the optical link performance are presented. Furthermore, data transmission performance is analyzed. Finally, the achieved results are discussed.

Keywords: hollow-core fibers, free space optics, collimator, planoconvex lens

Title translation: Application of Hollow Core Optical fibers in Hybrid Optical links

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	1	8 Datový přenos	45
Seznam zkratk	1	8.0.1 Použité přístroje	45
Seznam symbolů	1	8.0.2 Měření BER a linearity systému	45
1 Úvod	3	9 Závěr	49
2 Optická vlákna s dutým jádrem	5	Literatura	51
2.1 Konvenční optická vlákna	5		
2.1.1 Vlákna s dutým jádrem	6		
2.1.2 Vlákna využívající fotonický zakázaný pás	8		
2.1.3 Vlákna využívající princip antirezonance	11		
2.2 Shrnutí vlastností HCF	15		
2.3 Využití HCF v sensorice a datových aplikacích	16		
3 Úvod do problematiky volnosvazkové optiky	19		
3.1 Popis měřených veličin a metod měření	20		
3.1.1 Stopa pole	20		
3.1.2 Divergence svazku	21		
3.1.3 Vložný útlum	22		
3.1.4 Testování kvality datového přenosu	23		
4 Návrh FSO spoje	25		
4.1 Popis spoje	25		
4.2 Možnosti vazby HCF do FSO . .	25		
5 Charakterizace HCF	27		
5.1 Optimalizace a výroba MFD adaptéru	28		
5.2 Měření divergence svazku opouštějícího HCF	30		
6 Simulace	33		
6.1 Simulace odečtu MFD a divergence	33		
6.2 Výstup simulace odečtu MFD divergence planokonvexních čoček .	33		
7 Konstrukce a experimentální ověření HCF kolimátoru	37		
7.1 Použité přístroje	37		
7.2 Popis konstrukce kolimátoru . . .	37		
7.3 Výroba kolimátoru a ladění FSO spoje	38		
7.4 Měření parametrů hybridního optického spoje	41		

Obrázky

2.1 Porovnání průměrů jader SMF a MMF. Jádru je vyznačeno béžově a plášť šedě. Převzato z [46] [upraveno].	6	3.3 Schéma měření divergence.	22
2.2 Konstrukce PBG vlákna, vytvořeném v roce 1999. Převzato z:[39] [upraveno].	7	4.1 Schéma navrženého hybridního optického spoje využívajícího jako vstupní vlákno HCF.	25
2.3 Konstrukce antirezonančního vlákna s měrným útlumem menším než 1000 dB. Převzato z:[44] [upraveno].	8	5.1 Geometrie vlákna typu NANF. Obrázek je převzat z:[23] [upraveno].	27
2.4 (a)-(c): PBG vlákna s konstrukcí jádra vynechávající 7 kapilár (d): Závislost útlumu na vlnové délce, modře vyznačeno pro vlákno (a), červeně pro vlákno (b). (e): Závislost útlumu na vlnové délce pro vlákno (c). Převzato z [37] [upraveno].	9	5.2 Schéma systému na určení optimální délky segmentu GRIN vlákna. EDFA: erbiem dopovaný vláknový zesilovač, OSA: optický spektrální analyzátor, PM: měřič optického výkonu.	29
2.6 (a): Konstrukce NANF vlákna. (b): Závislost měrného útlumu na vlnové délce, červeně vyznačen naměřený útlum, černě a čerchovaně vyznačen útlum předpovězený simulací. Převzato z [48] [upraveno].	11	5.3 Navázání HCF na SMF.	29
2.7 Popis struktur využívajících principů antirezonance s vyobrazenými parametry, kde n_1 je index lomu skla, n_0 index lomu vzduchu, t je tloušťka skleněné vrstvy a D_{core} je průměr jádra [5] [upraveno].	13	5.4 Závislost IL na délce MFD adaptéru.	30
2.8 Průřez vývojově staršími ARF s vyobrazením jednotlivých parametrů. D_{core} je průměr jádra, D_{cap} průměr kruhového rezonátoru, g mezera mezi rezonátory a t je tloušťka stěny kruhového rezonátoru[5] [upraveno].	14	5.5 Spektra měřená na výstupu systému pro jednotlivé délky MFD adaptérů.	31
2.9 (a): Konstrukce DNANF vlákna (b): Závislosti měrného útlumu na vlnové délce, modře DNANF, konvenční SMF červeně, extrémně vyčištěné SMF růžově a fialově (c): Detail z (b). [45] [upraveno]	15	5.6 Schéma měřícího zapojení pro určení divergence optického svazku vystupujícího z HCF. CCD: Charge-coupled device (čip kamery použitý pro snímání svazku), PC: zpracování dat.	31
3.1 Schéma obecného FSO spoje.	20	6.1 Schéma simulace jednotlivých parametrů. A) Zdroj gaussovského svazku B) Čočka C) Detector viewer na určení MFD ve vzdálenosti 5 cm od čočky E) a F) Detector viewers na vyhodnocení divergence z rozdílu MFD.	34
3.2 Podélný řez nejužšího místa gaussovského svazku (fokusu) s vyznačenými parametry [17].	21	6.2 Graf vývoje intenzity záření v příčném směru ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.	34
		6.3 Graf vývoje intenzity záření v příčném směru x ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.	35
		6.4 Graf vývoje intenzity záření v příčném směru y ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.	35
		7.1 Schéma kolimátoru postaveném na modulárním trubcovém systému.	38

7.2 Schéma adaptéru z vnějšího průměru 12,7 mm na vnitřní průměr 2,07 mm. Uvedené rozměry na obrázku jsou v mm.	38
7.3 Schéma systému použitého při navázání HCF.	39
7.4 Spektra na výstupu systému při navazování HCF na SMF.	39
7.5 Schéma systému použitého při umístění HCF do ohniska kolimátoru a ladění FSO spoje. PM: power meter.	40
7.6 Obrázky pořízené při sestavování kolimátoru a ladění FSO spojů.	41
7.7 Schéma systému na měření divergence optického svazku vystupujícího z HCF kolimátoru. .	42
7.8 Měření parametrů svazku FSO spoje.	43
8.1 Schéma systému použitého na měření BER.	46
8.2 Závislost výstupního optického výkonu na vstupním optickém výkonu.	46
8.3 Závislost BER na výstupním výkonu.	46

Tabulky

5.1 Měření divergence svazku opouštějícího samotné HCF	31
7.1 Měření divergence s prvním měřením ve vzdálenosti 36 cm od kolimátoru	42
7.2 Měření divergence s prvním měřením ve vzdálenosti 78,5 cm od kolimátoru	42

Seznam zkratek a symbolů

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ARF	anti-resonant fiber (antirezonanční vlákno)
ARROW	anti-resonant reflecting optical waveguide (model antirezonanční reflexe)
BER	bit error rate (bitová chybovost)
BERT	bit error rate tester (tester bitové chybovosti)
CL	confinement loss (ztráta vyzářením)
CCD	charged-coupled device (zařízení s vázanými náboji)
DNANF	double nested antiresonant nodeless fiber (antirezonanční vlákno s trojitým rezonátorem)
EDFA	erbium doped fiber amplifier (erbiem dopovaný vláknový zesilovač)
GRIN	gradient-index (gradientní profil indexu lomu)
HCF	hollow-core fiber (duté optické vlákno)
HOMs	higher-order modes (vidy vyšších řádů)
MMF	multi-mode fiber (vícevidové vlákno)
NANF	nested antiresonant nodeless fiber (antirezonanční vlákno s dvojitým rezonátorem)
NRZ	non return to zero (bez návratu k nule)
OOK	On-Off keying (bipolární modulace)
OSA	optical spectrum analyzer (optický spektrální analyzátor)
TDFEA	thulium doped fiber amplifier (thuliem dopovaný vláknový zesilovač)
PBG	photonic band gap (fotonický zakázaný pás)
PM	power meter (měřič optického výkonu)
SI	step index (skokový profil indexu lomu)
SMF	single-mode fiber (jednovidové vlákno)
SNR	signal to noise ratio (odstup signálu od šumu)
SL	scattering loss (rozptylové ztráty)
SSL	surface scattering loss (rozptylové ztráty na rozhraní)

Seznam symbolů

Zkratka Význam

k_T	příčná složka vlnového vektoru
t	tloušťka vrstvy
k_0	velikost vlnového vektoru ve vzduchu
λ	vlnová délka
n_0	index lomu vzduchu
n_1	index lomu křemenného skla
D_{core}	průměr jádra
D_{cap}	průměr kapiláry
p	počet kapilár
r	radiální vzdálenost od osy svazku
w_0	poloměr stopy pole / pološířka svazku
θ	divergenční úhel
M^2	M^2 faktor
l	délka
f	ohnisková vzdálenost
P_{in}	vstupní výkon
P_{out}	výstupní výkon
P_{ref}	referenční výkon

Kapitola 1

Úvod

Šíření vlny v konvenčních optických vláknech je limitováno fundamentálními vlastnostmi materiálu (křemenného skla), který dále neumožňuje zlepšení přenosových vlastností z hlediska ztrát signálu a šířky pásma. Možnou alternativou by mohla být optická vlákna odlišné konstrukce, kde je vlna vedena ve vzduchovém jádře (vlákna s dutým jádrem neboli hollow-core fiber, HCF). Tato vlákna disponují teoreticky nižšími ztrátami, velkou šířkou pásma a nižším zpožděním (latencí). Všechny tyto vlastnosti lze využít v datových aplikacích, kde vlákna s dutým jádrem mohou umožnit vysokokapacitní přenos, nebo doručit informaci s nízkým zpožděním. Optická vlákna s dutým jádrem navíc umožňují přenos podstatně většího optického výkonu než konvenční optická vlákna i díky své nízké nelinearitě. Výše zmíněné vlastnosti dělají z vláken s dutým jádrem zajímavou volbu v rámci uplatnění v kombinaci s volnosvatkovou optikou (free-space optics, FSO). Bylo by tak možné vytvořit hybridní optický spoj, kde by se signál šířil po celé trase ve vzduchu.

Návrh hybridního optického spoje propojujícího vláknově-optickou část s FSO částí je náplní této práce. Vláknově-optickou částí je rozuměn návrh kolimátoru tvořeného planokonvexní čočkou a optickým vláknem s dutým jádrem. FSO část je pak oblast spoje mezi navrženým HCF kolimátorem a konvenčním kolimátorem pro optická vlákna s pevným jádrem. Optický spoj je navržen pro vlnovou délku 1550 nm.

V úvodní kapitole se věnuji charakterizaci jednotlivých typů optických vláken s dutým jádrem a jejich porovnání s konvenčními křemennými vlákny. Další kapitola je věnována obecnému popisu FSO spojů. V rámci této části se dále zaměřuji na popis parametrů spojených s kolimací svazků a datovým přenosem. V následující kapitole se věnuji obecnému návrhu FSO spoje navázaného na HCF a popisu vazby mezi vláknem a FSO částí. V této části jsou tak zejména formulovány specifiky zmíněné vazby včetně vlivu na návrh konstrukce HCF kolimátoru. Další kapitola se věnuje charakterizaci vhodného dutého optického vlákna pro aplikaci v rámci vláknově optické části hybridního spoje (HCF kolimátoru). V této části je také rozvedena problematika navázání dutých optických vláken na systémy postavené na konvenčních křemenných jednovidových vláknech. Následuje simulační studie zaměřující se na parametry kolimovaného svazku v FSO části. Na základě provedených simulací je vybrána vhodná čočka tvořící HCF kolimátor (vláknově optickou

část). Následující část je věnována návrhu a konstrukci HCF kolimátoru jako komponenty. Dále je sestaven celý FSO spoj a uskutečněno měření parametrů kolimovaného svazku. Poslední část je věnována datovému přenosu skrze realizované FSO spoje.

Kapitola 2

Optická vlákna s dutým jádrem

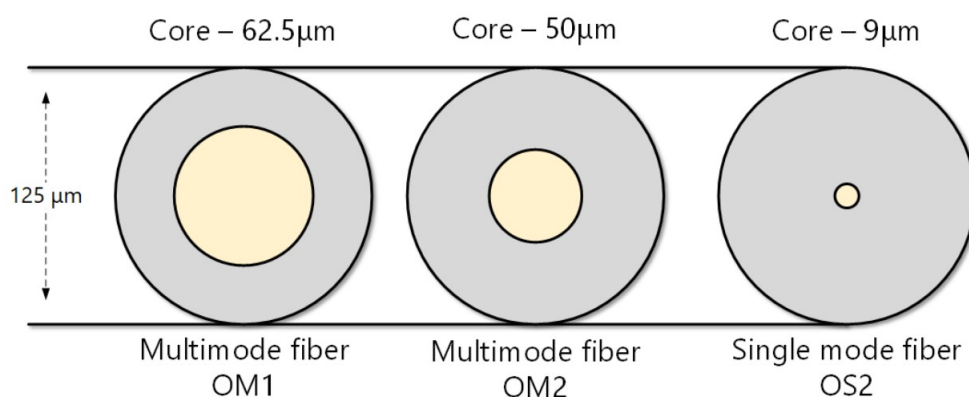
V této kapitole prvotně pro srovnání uvedu základní parametry konvenčních optických vláken a dále pak v detailu budu diskutovat optická vlákna s dutým jádrem.

2.1 Konvenční optická vlákna

Optická vlákna jsou dielektrické vlnovody s kruhovým průřezem. Princip vedení vlny je založen na totálním odrazu uvnitř optického vlákna tvořeného jádrem a pláštěm. Totálního odrazu je zde dosaženo díky faktu, že jádro disponuje větším indexem lomu nežli plášť. Rozložení indexu lomu v průřezu vlákna může být skokové, v tomto případě mluvíme o vlákně se skokovým indexem lomu (step-index, SI). Naproti tomu existuje možnost, kdy se index lomu mění spojitě s radiální vzdáleností od optické osy vlákna. Tento typ vlákna je označován jako vlákno s gradientním indexem lomu (gradient-index, GRIN).

Optická vlákna se dále dělí na vícevidová (multi-mode fiber, MMF) a jednovidová (single-mode fiber, SMF). U MMF je v jádře vlákna vedeno více vidů. Jedná se o vlákna, která jsou vhodná pro přenos informace na vzdálenosti do řádu stovek metrů. Vlákno má navíc obecně výrazně větší průměr jádra oproti SMF, typické průměry jádra jsou 50 μm a více, viz obrázek 2.1. Mezi výhody MMF oproti SMF patří, že k buzení mohou být využity jednodušší zdroje (např. LED). Kvalita přenosu není tak citlivá vůči zarovnání vlákno/zdroj popřípadě vlákno/vlákno v konektoru [9]. Dalším typem optických vláken jsou SMF, kde je v jádře veden pouze dominantní vid. Jedná se o typ vlákna, který je vhodný pro přenos informace na větší vzdálenosti, zejména v řádu jednotek až stovek kilometrů. Průměr jádra SMF je typicky 8,2 μm [49]. Výhodou těchto vláken je velká datová přenosová kapacita a vedení pouze dominantního vidu (důležité pro aplikace, kde není přípustné rozložení výkonu do více vidů). Vlákna jsou typicky buzena zdroji v oblastech vlnových délek 1300 nm a 1550 nm [12].

Primárním zdrojem útlumu u křemenných vláken je rozptyl (scattering loss, SL). Přesněji se jedná o Rayleighův rozptyl, který způsobují molekulární nehomogenity materiálu. Právě díky Rayleighovu rozptylu nelze útlum SMF nadále snižovat, což směřuje k hledání jiných principů vedení v optických



Obrázek 2.1: Porovnání průměrů jader SMF a MMF. Jádru je vyznačeno béžově a plášť šedě. Převzato z [46] [upraveno].

vláknech. Dalším zdrojem útlumu je únik vlny z jádra do pláště, což nastává při ohybu a zkroucení vlákna. Ke ztrátám také přispívají mikroohyby, což jsou defekty přímocárnosti optické osy vlákna. Křemenná vlákna vykazují nejnížší útlum v oblasti vlnových délek okolo 1550 nm. U konvenčních křemenných SMF bývá běžně dosaženo měrného útlumu 0,2 dB/km [49] na vlnové délce 1550 nm. Nejnížší dosažený útlum byl 0,14 dB/km na vlnové délce 1550 nm [4].

Šířka pásma křemenných vláken je na krátkých vlnových délkách (méně než 800 nm) omezena vysokým útlumem způsobeným Rayleighovým rozptylem. Pro vlnové délky větší než 1600 nm je přenos omezen narůstajícími ztrátami způsobenými absorpcí křemenného skla.

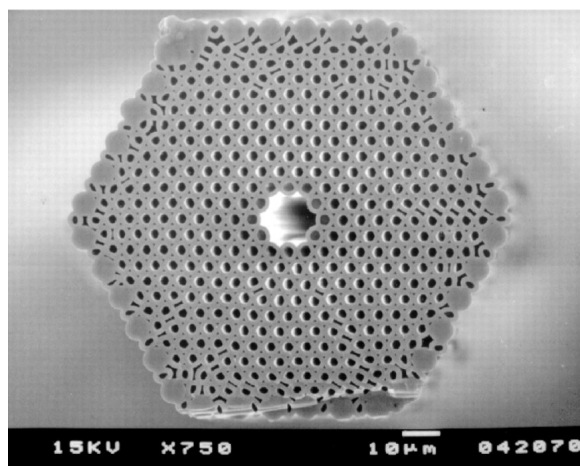
Při přenosu většího optického výkonu skrze vlákno dochází k prosazování nelineárních jevů. Jako nejvíce limitující se projevuje stimulovaný Brillouinův rozptyl. Nejvýraznější projev Brillouinova rozptylu je spojen s užitím zdrojů s úzkou spektrální čarou (např. Laser). Tento jev tak značně limituje velikost výkonu přenášeného optickým vláknovým systémem [10]. Dalším jevem je Ramanův rozptyl, který na rozdíl od Brillouinova nelimituje velikost optického výkonu vpuštěného do systému. Naopak tento jev může mít i pozitivní dopad tím, že může být využit na zesílení signálu [11]. Rychlost šíření signálu skrze křemenné sklo je omezena indexem lomu. Typická velikost indexu lomu křemenného skla používaného pro výrobu jader optických vláken nabývá velikosti 1,4682. Na vlnové délce 1550 nm tak dochází ke snížení rychlosti přibližně na $204,19 \times 10^6 \text{ m/s}$ [47]. Jedná se o pokles rychlosti přibližně o 32% oproti rychlosti světla ve vakuu. Zpoždění signálu šířícího se skrze nějaké médium je v literatuře označováno jako latence.

2.1.1 Vlákna s dutým jádrem

Novodobé aplikace optických vláken vyžadují stálé snižování měrného útlumu a zvyšování rychlosti šíření signálu. Dalším důležitým faktorem je rozšiřování přenosového pásma. Konvenční křemenná vlákna jsou z ohledu nejnížšího

útlumu limitována Rayleighova rozptylem, který bohužel nejde dále minimalizovat. Z pohledu rychlosti šíření signálu skrze vlákno, je tato rychlost také omezena kvůli indexu lomu křemenného skla. Šířka pásma křemenného vlákna je také omezena na rozsah vlnových délek 800 až 1600 nm se zachováním relativně nízkého měrného útlumu. Je tedy pochopitelné, že existuje motivace na vývoj nových optických vláken, které vedou vlnu pomocí odlišných principů než aktuálně hojně využívaná křemenná vlákna. Výrazného snížení zmíněných parametrů se dá dosáhnout v situaci, kdy je vedena vlna v oblasti s nízkým indexem lomu. Vznikají tak nové konstrukce vláken, které mají duté jádro obklopené skleněnou mikrostrukturou. Tyto vlákna se souhrnně označují jako optická vlákna s dutým jádrem (hollow-core fibers, HCFs). Následuje krátký přehled časového vývoje HCF, po kterém jsou rozvedeny nově využívané principy vedení vlny a přenosové vlastnosti HCF.

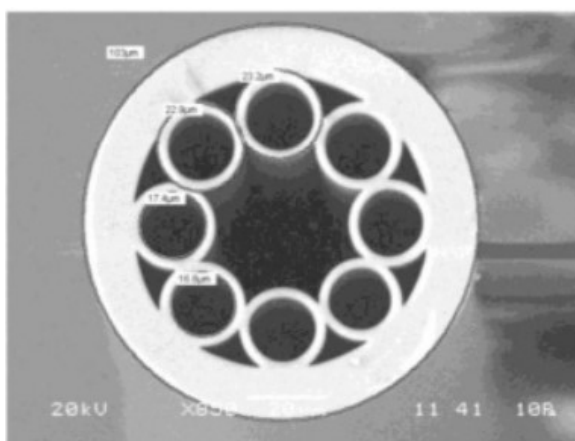
První křemenné vlákno částečně využívající k vedení vlny principu fotonického zakázaného pásu (photonic band gap, PBG), bylo vytvořeno v roce 1996 [38]. Zjednodušený princip PBG je uveden v následující podkapitole. Toto vlákno vzniklo na základě výzkumu Y. Jablonovitche [40] a S. Johna [41] demonstrujícího vznik a PBG ve strukturách 2D a 3D fotonických krystalů. První realizované vlákno, jehož princip vedení vlny v dutém jádře byl založen čistě na PBG, bylo zkonstruováno v roce 1999 [39]. Konstrukce vlákna je k nalezení na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Konstrukce PBG vlákna, vytvořeném v roce 1999. Převzato z:[39] [upraveno].

Velkým pokrokem bylo, když byl v roce 2002 u konstrukce vynechávající 7 kapilár v jádře naměřen útlum 13 dB/km na vlnové délce 1550 nm [42]. V roce 2004 došlo k dalšímu značnému průlomů, když u vlákna vynechávajícího 19 kapilár v jádře bylo dosaženo útlumu 1,7 dB/km na vlnové délce 1565 nm [43]. V roce 2005 byl měrný útlum dále snížen na 1,2 dB/km [8]. Jedná se o dodnes nejnižší dosažený měrný útlum u PBG vlákna. Šířka pásma u PBG vlákna s nejnižším měrným útlumem byla 70 THz [5]. U PBG vláken se následně ukázalo, že skloubení velké šířky pásma se zachováním nízkého měrného útlumu je velice komplikované, což vyústilo ve výrazné zpo-

malení vývoje těchto vláken. Následoval tak vývoj a hledání nových geometrií struktur, které se principem vedení vlny postupně přesouvaly k vedení čistě za pomoci principu antirezonance (antiresonant fibers, ARF). Tento princip bude také více do hloubky nastíněn v následující podkapitole. Výrazným představitelem se staly ARF využívající kruhových rezonátorů. Tento typ vláken nabízel oproti předešlým vláknům relativně jednoduchou konstrukci a stále se zlepšující přenosové vlastnosti. První vlákno osazené kruhovými rezonátory, které vykazovalo útlum menší než 1000 dB/km, bylo vytvořeno v roce 2011 [44]. Konstrukce vlákna je k nalezení na obrázku 2.3.



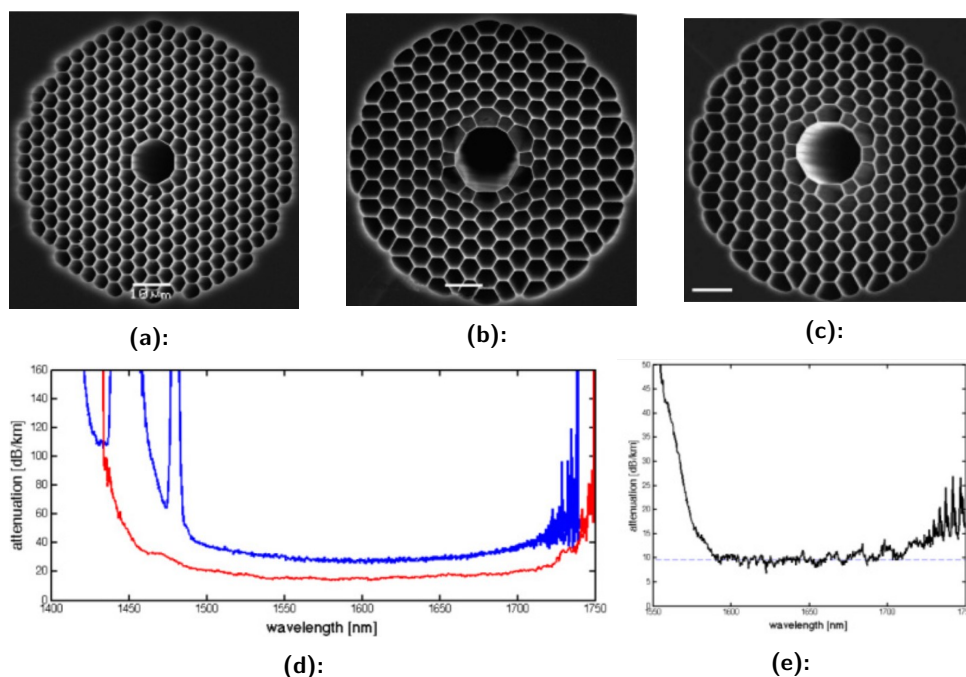
Obrázek 2.3: Konstrukce antirezonantního vlákna s měrným útlumem menším než 1000 dB. Převzato z:[44] [upraveno].

V roce 2017 bylo u konstrukce, která zamezovala vzájemnému dotyku jednotlivých rezonátorů, dosaženo útlumu 7,7 dB/km na vlnové délce 750 nm (konstrukce využívající 6 rezonátorů) [35]. Dalším výrazným průlomem se staly vlákna složená z více rezonátorů vložených do sebe (nested antiresonant nodeless fibers, NANF) a nejnovější struktura označovaná jako DNANF (double nested antiresonant nodeless fibers). U struktury NANF bylo v roce 2020 dosaženo 0,28 dB/km pro rozmezí vlnových délek 1510 nm až 1600 nm [2] Nejnovější vlákno DNANF vykazuje útlum $0,174 \pm 0,031$ dB/km pro vlnové délky odpovídající pásmu 1530 až 1565 nm. Skrze pásma 1260 až 1360 nm a 1530 až 1625 nm toto vlákno dosahuje měrného útlumu menšího než 0,3 db/km [45].

2.1.2 Vlákna využívající fotonický zakázaný pás

Tento typ vláken je složen z periodické dielektrické struktury vzduchem plněných kapilár. Zmíněná struktura se chová jako 2D fotonický krystal [7]. Ve středu vlákna je struktura fotonického krystalu narušena defektem vytvořeným absencí určitého počtu 3, 7, 19 či 37 kapilár [5]. Defekt je následně označován jako jádro vlákna a přilehlá mikrostruktura jako plášť.

Vedení vlny uvnitř jádra je dosaženo pomocí jevu známého jako fotonický zakázaný pás (photonic band gap, PBG), který zamezuje vytvoření vazby



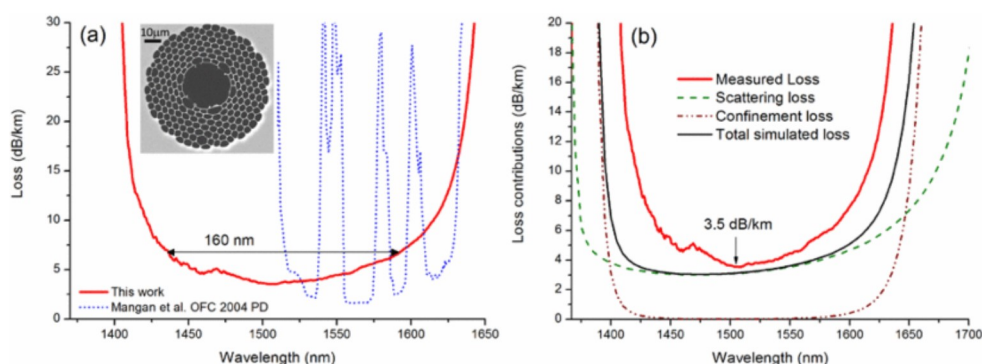
Obrázek 2.4: (a)-(c): PBG vlákna s konstrukcí jádra vynechávající 7 kapilár (d): Závislost útlumu na vlnové délce, modře vyznačeno pro vlákno (a), červeně pro vlákno (b). (e): Závislost útlumu na vlnové délce pro vlákno (c). Převzato z [37] [upraveno].

a následného průniku vlny do pláště [6]. PBG vzniká na základě 2D struktury fotonického krystalu [7] a způsobuje, že se struktura pláště chová pro určité rozmezí vlnových délek jako odrazná vrstva.

Vlnová délka šířené vlny se musí nacházet v pásmu, pro které existuje PBG. Pásmo PBG je závislé na volbě mikrostruktury, tloušťce stěn kapilár, rozměru vzduchových dutin a indexu lomu použitého skla [1]. Nejširšího pásma bylo v praxi dosaženo u vláken, která měla ztenčené stěny kapilár obklopujících jádro. Rozšiřování přenosového pásma je u PBG vláken vykoupeno navýšením minimálního měrného útlumu. Tato skutečnost je demonstrována na obrázku 2.5. Jedná se o modernější PBG vlákno vynechávající v jádře 19 kapilár [36]. Při dosažení rozumné šířky pásma (rozsah vlnových délek 160 nm s nárůstem útlumu pod 3 dB) lze vidět, že velikost minimálního měrného útlumu naroste na hodnotu 3,5 dB/km na vlnové délce 1500 nm, viz obrázek 2.5(a) červená závislost. Jedná se tak o znatelný nárůst oproti vláknu obdobné konstrukce pláště koncipovaném na dosažení minimálního měrného útlumu 1,7 dB/km na vlnové délce 1565 nm [43] (naopak vykoupené menší šířkou pásma pouze 20 nm s minimálním měrným útlumem).

Obdobně se chová i vlákno vynechávající v jádře 7 kapilár [37]. Vlákna jsou popsána na obrázku 2.4(a)-(c). Vývojově staršímu vláknu (a) odpovídá modře vyznačená závislost v (d). Modernějšímu vláknu (b) odpovídá červeně vyznačená závislost v (d). Je patrné, že modernější vlákno (b) dosahuje menšího měrného útlumu a větší šířky přenosového pásma než vlákno (a).

Vlákno (b) je koncipováno více na maximalizaci přenosového pásma. Nejnižšího měrného útlumu 15 dB/km dosahuje na vlnových délkách v oblasti okolo 1600 nm, ale zároveň vykazuje útlum pod 50 dB/km pro rozsah vlnových délek 300 nm. Vlákno (c) je koncipováno více na minimalizaci měrného útlumu, jehož velikost je 9,5dB/km na vlnové délce 1650 nm. Vlákno dosahuje minima měrného útlumu pro rozsah vlnových délek 100 nm. Obě vlákna (b) a (c) disponují ztenčenými stěnami kapilár přiléhajících k jádru, proto obě tyto vlákna vykazují relativně široká pásma. Přesto je opět patrné zúžení pásma u vlákna koncipovaného na menší měrný útlum.



Obrázek 2.5: Závislosti měrného útlumu na vlnové délce pro PBG vlákna konstrukce vynechávající 19 kapilár (a): Modře vyznačena závislost vlákna koncipovaného na minimální měrný útlum, červeně vyznačena závislost vlákna koncipovaného na širší přenosové pásmo (b): Složení ztrát u širokopásmového vlákna. Převzato z [36] [upraveno].

■ Přenosové vlastnosti PBG vláken

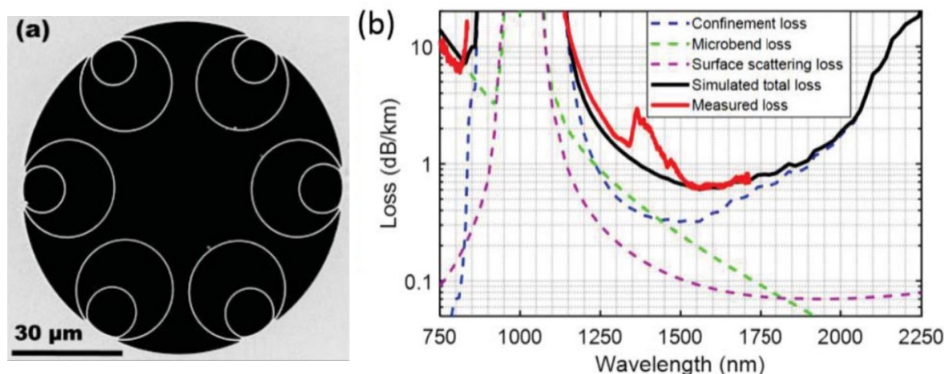
Složka měrného útlumu způsobena Rayleighova rozptylem je u HCF oproti SMF výrazně nižší[1]. Dominantní složkou útlumu je rozptyl na rozhraní vzduchového jádra se skleněnou strukturou pláště (surface scattering loss, SSL), viz obrázek 2.5(b). K rozptylu dochází na nehomogenitách (zvlnění) na stěnách kapilár přiléhajících jádru, které vznikají v rámci procesu výroby při chladnutí skla. Dalším zdrojem útlumu je pronikání vlny do pláště (confinement loss, CL), jež lze v praxi minimalizovat přidáním více vrstev periodické mikrostruktury v kruhovém uspořádání. Nejnižší dosažený útlum u PBG vláken byl 1.2 dB/km[8] u vlákna s neztenčenými stěnami kapilár přiléhajících k jádru (což se projevilo zúžením šířky pásma s minimálním měrným útlumem).

Relativně velké rozměry jádra připouští existenci vidů vyšších řádů (higher-order modes, HOMs). Téměř jednovidového přenosu lze docílit správnou vazbou mezi dominantním videm LP_{01} a zdrojem. Vid LP_{01} vykazuje téměř kruhovou geometrii. Jak bylo zmíněno, částečné vybudzení HOMs nelze zcela eliminovat, ale je možné dosáhnout jejich výrazného potlačení. Příkladem může být konstrukce vynechávající 7 kapilár v jádře. Tato konstrukce sama

o sobě, kvůli rozměrům jádra existenci HOMs připouští, ale při přenosu na větší vzdálenost se projeví výrazně vyšší útlum HOMs vůči dominantnímu vidu. Při aplikaci dostatečně dlouhého úseku tohoto vlákna lze tedy dosáhnout jednovidového přenosu. HOMs vykazují oproti dominantnímu vidu potlačení o 30 dB [5]. Výrazné potlačení HOMs vyazuje také struktura vynechávající 3 kapiláry. Vybuzení pouze dominantního vidu (dvou ortogonálních polarizací) je zde dáno přímo geometrií jádra (malý průměr). Přenosu jednoho vidu je zde dosaženo i na krátkém úseku vlákna. Nevýhodou zmíněné konstrukce je navýšení SSL oproti konstrukci vynechávající 7 kapilár[1].

2.1.3 Vlákná využívající princip antirezonance

V tomto typu HCF je vedení vlny dosaženo pomocí antirezonantní reflexe, plášť je tvořen kruhovými rezonátory (kapilárami), viz obrázek 2.6(a). Antirezonanci jednotlivých vrstev lze dobře popsat ARROW (anti-resonant reflecting optical waveguide) modelem [13]. Pro vlákna využívající princip antirezonance (anti-resonant fiber, ARF) jsou pak typické vlnové délky, u kterých dochází k vysokému útlumu zapříčiněnému vazbou dominantního vidu s rezonantními vidy kapilár. Tato skutečnost je dobře patrná na obrázku 2.6(b), kde v oblasti vlnových délek 800-1250 nm dochází k prudkému nárůstu útlumu způsobeného právě zmíněnou vazbou.



Obrázek 2.6: (a): Konstrukce NANF vlákna. (b): Závislost měrného útlumu na vlnové délce, červeně vyznačen naměřený útlum, černě a čerchovaně vyznačen útlum předpovězený simulací. Převzato z [48] [upraveno].

ARROW model

Princip antirezonance bude nejprve vysvětlen pomocí 1D modelu, popsáno na obrázku 2.7(a).

Rezonanční podmínka je splněna, když fázový rozdíl mezi vlnou procházející stěnou skleněné kapiláry s odrazem a bez odrazu od protějšího rozhraní odpovídá násobku 2π [13]. Stěna kapiláry má tloušťku t , viz obrázek 2.7(a). Ve vrstvě pak vzniká příčné stojaté vlnění a podélná prostupující vlna, vid

skleněné vrstvy. Rezonanční podmínka je pro příčnou složku vlnového vektoru k_T ve skleněné vrstvě popsána v následující rovnici [5]:

$$k_T t = \pi m \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

Vztah příčné složky vlnového vektoru k_T vůči velikosti vlnového vektoru ve vzduchu k_0 pro index lomu vzduchu n_0 a skla n_1 lze pro průměr jádra $D_{core} \gg \lambda$ aproximovat následným vztahem [13]:

$$k_T = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2}, \quad (2.2)$$

Parametr k_0 pak označuje velikost vlnového vektoru pro monochromatickou vlnu ve vzduchu [13]:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Z rezonanční podmínky lze pak odvodit tloušťku skleněné vrstvy t [13]:

$$t = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

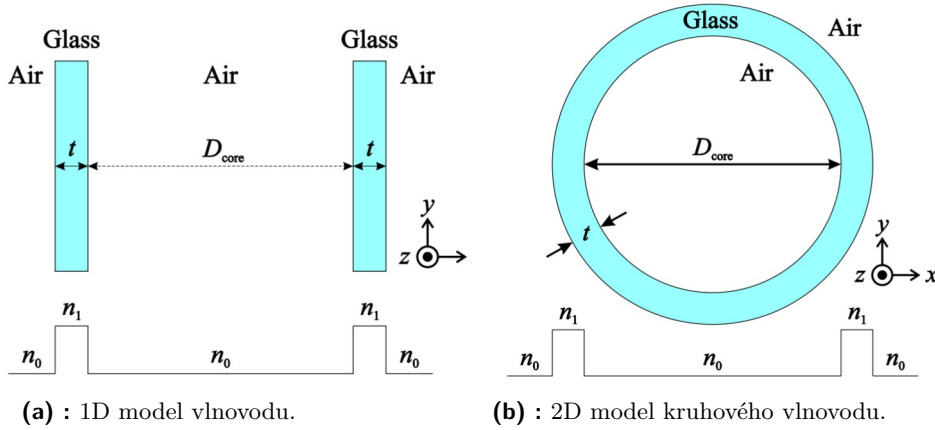
Pro tuto tloušťku stěny dochází ke splnění rezonanční podmínky a vazbě vidů jádra s vidy skleněné struktury. K antirezonanci naopak dochází za podmínky [13]:

$$t = \frac{(m - 0.5)\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

Při splnění této podmínky k vazbě mezi vidy jádra s vidy skleněné struktury nedochází. Antirezonance skleněné vrstvy částečně zamezuje úniku vidů z jádra, ale tento mechanismus není perfektní. K částečnému vyzáření v tranzverzálním směru (úniku vidů z jádra) tak stále dochází. Tento zdroj útlumu je charakterizován jako CL.

Pomocí tohoto modelu byla vysvětlena antirezonance tenké skleněné vrstvy tvořící stěny kapilár.

Dále se přesuneme k dvoudimenzionálnímu zobecnění pro vzduchové jádro s nízkým indexem lomu n_0 a průměrem D_{core} obklopené kruhovou skleněnou stěnou s vysokým indexem lomu n_1 a tloušťkou t , viz obrázek 2.7(b). Vidy existující ve skleněné struktuře vykazují efektivní index lomu, který je větší než index lomu ve vzduchovém jádře n_0 a zároveň je menší než index lomu skleněné struktury n_1 . Vidy přítomné ve vzduchovém jádře naopak vykazují efektivní indexy menší než n_0 a n_1 . V závislosti na t budou pro dominantní vid jádra přítomna rozmezí velikostí t , kdy bude docházet k nižším ztrátám způsobeným CL (splnění antirezonanční podmínky skleněné vrstvy). Naproti tomu jsou rozmezí velikostí t , kdy antirezonanční podmínka skleněné vrstvy splněná nebude a bude docházet k velkým ztrátám zapříčiněným CL. Antirezonanční podmínka není závislá na D_{core} , naopak CL s narůstajícím D_{core} klesá [13].



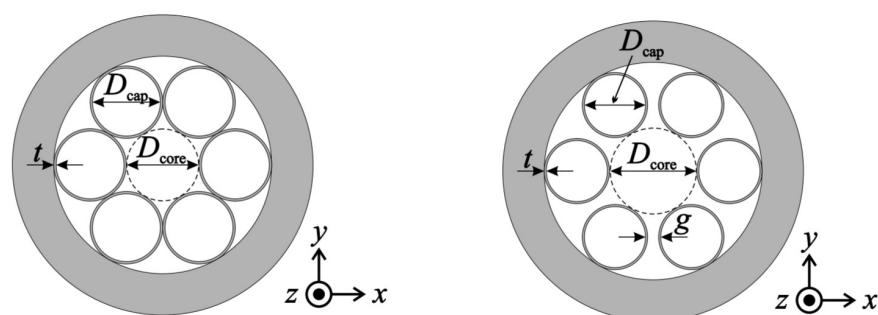
Obrázek 2.7: Popis struktur využívajících principů antirezonance s vyobrazenými parametry, kde n_1 je index lomu skla, n_0 index lomu vzduchu, t je tloušťka skleněné vrstvy a D_{core} je průměr jádra [5] [upraveno].

Následuje popis struktury, kdy je jádro navíc obklopeno kruhovými rezonátory s vnitřním průměrem D_{cap} , tloušťkou stěny t a počtem rezonátorů p , viz obrázek 2.8(a). Velikost t je taková, aby byla splněna antirezonanční podmínka. Rozhraní mezi vzduchovým jádrem a pláštěm je nyní tvořeno skleněnými stěnami rezonátorů (kapilár), vykazujícími negativní zakřivení v radiálním směru. Průměr jádra lze stanovit podle následujícího vztahu [13]:

$$D_{core} = \frac{D_{cap} + 2t}{\sin(\pi/p)} - (D_{cap} + 2t) \quad (2.6)$$

Efektivní index lomu dominantního vidu jádra je u vlákna osazeného kruhovými rezonátory vyšší než u vlákna, kde je jádro obklopeno pouze kruhovým pláštěm. Nárůst efektivního indexu lomu je způsoben negativním zakřivením rezonátorů v radiálním směru, který se projeví nárůstem D_{core} vlákna osazeného rezonátory oproti vláknu pouze s kruhovým pláštěm. Dorovnání efektivního indexu lomu dominantního vidu vlákna s kruhovým pláštěm, tak aby si odpovídal s efektivním indexem lomu dominantního vidu vlákna osazeného rezonátory, lze docílit 5% nárůstem velikosti D_{core} vlákna s kruhovým pláštěm [13]. V situaci, kdy si efektivní indexy lomů dominantních vidů obou vláken odpovídají, je tloušťka stěny rezonátorů t lehce tenčí než tloušťka stěny vlákna pouze s kruhovým pláštěm. Je to způsobeno skutečností, že negativní zakřivení způsobuje zmenšení tloušťky stěny rezonátoru při zachování antirezonanční podmínky skleněné vrstvy. Při porovnání obou těchto vláken ve stavu, kdy si jejich efektivní indexy lomů dominantních vidů odpovídají, vlákno osazené kruhovými rezonátory vykazuje CL výrazně nižší oproti vláknu pouze s kruhovým pláštěm. U vlákna osazeného 6 kruhovými rezonátory s $D_{core} = 30\mu m$ a $t = 0,8\mu m$ odpovídal pokles CL o tři řády [13].

Dalšího snížení CL lze dosáhnout omezením počtu míst dotyku kruhových rezonátorů. Místa dotyku jsou oblasti, které se pak nenachází v antirezonanci a přispívají tak ke zvyšování CL. U těchto struktur se kruhové rezonátory



(a) : ARF s navzájem se dotýkajícími kruhovými rezonátory.

(b) : ARF s navzájem se nedotýkajícími kruhovými rezonátory.

Obrázek 2.8: Průřez vývojově staršími ARF s vyobrazením jednotlivých parametrů. D_{core} je průměr jádra, D_{cap} průměr kruhového rezonátoru, g mezera mezi rezonátory a t je tloušťka stěny kruhového rezonátoru[5] [upraveno].

nedotýkají navzájem, ale dotýkají se pouze v jednom bodě s vnější strukturou skleněného pláště, viz obrázek 2.8(b). Vzniklé mezery mezi rezonátory jsou v obrázku 2.8(b) vyznačeny jako g a mají také značný podíl na velikosti CL. Pokud je g příliš velké, dochází k značnému úniku vidů z jádra skrze tuto mezeru. Při vhodné volbě g pro danou geometrii vlákna naopak dochází ke snížení CL dominantního vidu jádra [5].

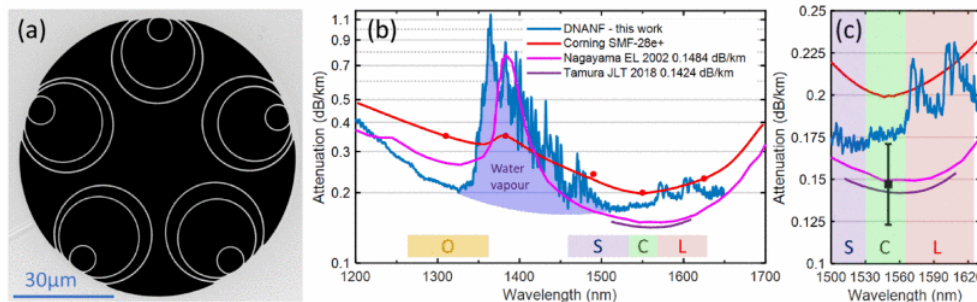
Antirezonance zamezuje vazbě vidů jádra s vidy skleněné struktury tvořící plášť a částečně přispívá k udržení vidů jádra uvnitř v jádře. Pro dosažení nízkého CL dominantního vidu jádra není tento efekt zcela postačující. Klíčovou roli zde hraje zamezení vazby dominantního vidu jádra s vidy kruhových rezonátorů (v literatuře označováno jako inhibited coupling). Toho lze docílit minimalizací prostorového překryvu dominantního vidu jádra s vidy rezonátorů. Dalšího snížení CL lze dosáhnout pomocí rozdílu efektivních indexů lomu dominantního vidu jádra vůči vidům rezonátorů [5].

■ Přenosové vlastnosti

Na rozdíl od PBG vláken nedochází u ARF k vazbě mezi vidy jádra s vidy skleněných stěn pláště. Děje se tak z důvodu antirezonance skleněné vrstvy. SSL způsobené rozptylem vlny na rozhraní sklo/vzduch je tedy zanedbatelné. K výraznému nárůstu SSL dochází pouze za předpokladu nesplnění antirezonanční podmínky skleněné vrstvy, viz obrázek 2.6(b).

Hlavní příčinou útlumu je tedy CL. Výrazného snížení CL lze dosáhnout vložением dvou kruhových rezonátorů (kapilár) do sebe. Oba rezonátory vykazují stejnou tloušťku stěn a jsou umístěny tak, aby se minimalizoval počet míst dotyku v celé struktuře[13]. Výsledná struktura se označuje NANF (nested antiresonant nodeless fiber), viz obrázek 2.6(a). Výše popsaný mechanismus vedení vlny není ani u této konstrukce perfektní a dochází tak stále k částečným ztrátám způsobeným CL. Velice nízkých útlumů bylo dosaženo u NANF vlákna sestávajícího z 6 kapilár, měrný útlum vlákna byl 0,28 dB/km

pro rozmezí vlnových délek 1510 až 1600 nm [2]. Aktuálně nejnižšího měrného útlumu bylo dosaženo u vlákna využívající struktury DNANF (dovnitř největších rezonátorů byly vloženy ještě dva další), viz obrázek 2.9(a). Jádrem, kterým je vlna vedena, je obklopeno pěti zmíněnými rezonátory (kapilárami). Měrný útlum tohoto vlákna byl 0,174 dB/km pro vlnové délky odpovídající pásmu 1530 až 1565 nm. Jedná se o velký průlom v technologii vláken s dutým jádrem, jelikož se jedná o první HCF, které v pásmech vlnových délek 1230 až 1360 nm a 1530 až 1565 nm vykazuje lepší přenosové vlastnosti než konvenční SMF [45], viz obrázek 2.9(b)



Obrázek 2.9: (a): Konstrukce DNANF vlákna (b): Závislosti měrného útlumu na vlnové délce, modře DNANF, konvenční SMF červeně, extrémně vyčištěné SMF růžově a fialově (c): Detail z (b). [45] [upraveno]

U ARF vláken HOMs vykazují útlum v řádu stovek až tisíců dB/km. Lze tedy i s krátkým úsekem vlákna dosáhnout výrazného potlačení HOMs. Důvodem je vazba mezi HOMs s vidy kruhových rezonátorů. Míra potlačení vazby mezi dominantním videm s vidy rezonátorů není takřka závislá na poměru mezi průměrem kruhových oscilátorů D_{cap} vůči průměru jádra D_{core} , viz obrázek 2.8(b). Je tomu tak z důvodu značného rozdílu mezi efektivním indexem lomu dominantního vidu jádra vůči efektivním indexům lomu vidů rezonátorů [13]. Vazba mezi HOMs s vidy oscilátorů je naopak na tomto poměru silně závislá. Správnou volbou tohoto poměru lze tedy docílit vysokého útlumu HOMs při zachování nízkého útlumu dominantního vidu jádra [13].

ARF umožňují vedení ve velkém rozsahu vlnových délek. Šířka pásma je převážně pouze omezená o určité vlnové délky, při kterých dochází k narušení antirezonanční podmínky, viz obrázek 2.6(b). ARF mohou tedy být například vhodnou konstrukcí pro datové aplikace, kde je velká šířka pásma značným benefitem.

2.2 Shrnutí vlastností HCF

PPG vlákna jsou vývojově starší konstrukcí HCF. Vedení vlny je dosaženo pomocí principu PBG. Hlavním zdrojem útlumu těchto vláken je SSL, CL je zanedbatelné díky mnoha vrstvám periodické struktury pláště. Dosažení nízkého měrného útlumu je balancováno značným zmenšením šířky pásma s minimálním měrným útlumem a naopak. Větší šířky pásma lze dosáhnout ztenčením stěn kapilár přiléhajících k jádru. Nejnižšího měrného útlumu

kacích. Kabel byl určen k telekomunikačnímu datovému přenosu 400 Gb/s v pásmu vlnových délek 1530 až 1565 nm. Měrný útlum samotného vlákna byl stanoven na 1,12 dB/km na vlnové délce 1550 nm [26].

HCF navíc umožňují rozšíření optického telekomunikačního pásma k vlnovým délkám okolo 2000 nm. Jedná se o oblast vlnových délek, kde lze aplikovat thuliem dopované zesilovače (TDFAs), které vykazují velké zesílení a nízkou hladinu šumu v pásmu o šířce 200 nm. Experiment byl uskutečněn na 1,15 km dlouhém úseku PBG vlákna. Dosaženo bylo datového přenosu 84 Gbit/s při využití modulace PAM-16. Vlákno vykazovalo měrný útlum menší než 3 dB/km v rozsahu vlnových délek 1959 až 2045 nm [27].

Jednou z možných aplikací v senzorce je využití HCF v rámci vláknových interferometrů a vláknových kyvet pro plnění plyny.

V oblasti vláknových rezonátorů lze docílit délky rezonanční komory v rámci jednotek až desítek metrů při zachování relativně kompaktních rozměrů celého systému. Benefitem využití HCF v konstrukčním řešení je nízké prosazování nelineárních jevů a teplotní stabilita, snižující nežádoucí posun interferenčních maxim [23].

HCF lze také uplatnit v konstrukci vláknových Sagnacových interferometrů používaných jako vláknově-optické gyroskopy. Benefity HCF v rámci této aplikace jsou nízká nelinearita a polarizační stabilita. V experimentu byly použity 2 úseky NANF vláken o délkách 136 m a měrných útlumech 20 dB/km a 2,8 dB/km [50]. Dalším benefitem NANF vláken oproti dříve uskutečněným experimentem postaveným na PBG vláknu [22] bylo výrazné potlačení vidů vyšších řádů a snížení rozptyly do zpětného směru.

Další aplikací je využití HCF ve spektroskopii plynů. Absorpce určitých vlnových délek je silně závislá na míře interakce zkoumaného plynu s vlnou, která se ním šíří. Pro efektivní vyhodnocení je potřeba dosáhnout dostatečné délky optické dráhy skrze zkoumaný plyn. Aplikací HCF lze vytvořit plynovou buňku značné délky umožňující dostatečnou interakci vlny s plynem. HCF navíc splňuje klíčovou podmínku velké šířky pásma. V experimentu byla použita 2 podobná PBG vlákna konstrukce vynechávající 19 kapilár v jádře. Vlákna byla zvolena, tak aby se jejich pásma navzájem doplňovala. Vlákna dohromady poskytovala šířku pásma v rozsahu 3150 nm až 3500 nm. [21].

Kapitola 3

Úvod do problematiky volnosvazkové optiky

Volnosvazková optika (free-space optics, FSO) se zabývá přenosem dat pomocí optického svazku ve volném prostoru. FSO spoj se sestává z vysílače, z něhož vystupuje svazek do volného prostoru. Vysílač je navržen tak, aby disponoval co nejnižší rozbíhavostí. Přijímač je navržen tak, aby optický svazek z volného prostoru co nejlépe zachytil, fokusoval a následně signál zpracoval. Výrazným benefitem FSO systémů je vysoká směrovost přijímače. Zisk antény (přijímače), tak může dosahovat vysokých hodnot (nad 100 dB)[30]. Výhodou vysoké směrovosti přijímače je v podstatě neexistující rušení sousedními systémy využívající stejnou technologii, směrovost se také projeví velkou odolností vůči rušení (okolní osvětlení, sluneční světlo) Vysoká směrovost přijímače ovšem také znamená, že je celý FSO spoj vysoce citlivý na jeho přesné naladění.

FSO spoje lze uplatnit k přenosu dat na velkou vzdálenost (v řádu tisíců kilometrů) v oblasti nacházející se mimo zemskou atmosféru. Dobrým příkladem je využití v rámci datového přenosu mezi orbitálními satelity [29]. Uskutečnění datového přenosu skrze atmosféru se stává mnohem obtížnějším úkolem. Výrazným faktorem jsou zde vlivy atmosféry, jako je přítomnost aerosolů (mlhy), vlivy počasí (děšť, sníh) nebo teplotní turbulence [31]. Popsané faktory limitují aplikaci FSO v zemské atmosféře na vzdálenosti v řádu stovek metrů až jednotek kilometrů. Rozbíhavost svazků se pro tyto aplikace pohybuje v řádu miliradianů (setiny stupně). Požadované průměry svazků vystupujících z vysílače se pohybují v řádech milimetrů až centimetrů. Využívané vlnové délky se pohybují v rozmezí blízkého infračerveného spektra (near infrared, NIR). Typickou vlnovou délkou využívanou ve FSO je 1550 nm a 850 nm, jedná se tak o délky využívané ve standardní vláknově-optické telekomunikační technice.

V rámci této práce se zabírám problematikou FSO spoje v atmosféře, dále zde bude vysvětlena jeho obecná konstrukce a klíčové parametry. Schématické vyobrazení FSO spoje je k nalezení na obrázku 3.1.

FSO spoj obecně sestává z vysílače a přijímače svazku nesoucího datový signál skrze volný prostor. Datový signál je od zdroje pomocí vlákna přiveden k vysílači. Vysílač sestává ze soustavy čoček sloužících jako kolimátor jehož úkolem je svazek rozšířit a tím výrazně snížit jeho rozbíhavost. Následuje šíření svazku volným prostorem až k přijímači. Ten sestává ze soustavy čoček



Obrázek 3.1: Schéma obecného FSO spoje.

určených k fokusaci svazku a jeho a opětovnému navázání od optického vlákna. Následuje přenos datového signálu skrze optické vlákno do místa jeho dalšího zpracování.

V rámci FSO části mezi vysílačem a přijímačem jsou klíčovými parametry svazku jeho rozbíhavost (divergence) a velikost stopy pole (transverzální rozměr svazku). Dalším důležitým parametrem je vložný útlum cesty (vysílač, volnosvazková oblast, přijímač). Při přenosu dat skrze tento systém se často vyhodnocuje chybovost přijatého datového signálu, bit error rate (BER). Definiční těchto parametrů a jejich metody měření jsou vysvětleny v následujících podkapitolách.

3.1 Popis měřených veličin a metod měření

Při měření parametrů svazků ve vláknově optické a FSO části vycházíme z předpokladu, že se jedná o gaussovské svazky. Rozložení intenzity optického pole tak lze modelovat pomocí gaussovské funkce.

3.1.1 Stopa pole

Při práci s jednovidovými optickými vlákny je potřeba znát nejen rozložení intenzity elektromagnetického pole uvnitř vlákna, ale i v oblasti, kde se svazek šíří již mimo vlákno. Díky kruhové symetrii dominantního vidu lze rozložení pole mimo vlákno popsat jediným parametrem zvaným Stopa pole (mode-field diameter, MFD).

Uvažujeme-li u šířeného svazku gaussovské rozložení intenzity, lze radiální intenzitu $I(r)$ definovat pomocí vztahu [18]:

$$I(r) = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2}, \quad (3.1)$$

kde $I(0)$ je maximální intenzita nacházející se na ose svazku, r je radiální vzdálenost od osy svazku a w_0 je poloměr stopy pole. Stopa pole je pak definována jako $2w_0$. Po dosazení poloměru stopy pole do radiální vzdálenosti $r = w_0$ lze pozorovat, že intenzita pole v této radiální vzdálenosti poklesne na násobek e^{-2} maximální intenzity v ose svazku. Stopa pole je pak definována právě tímto poklesem vůči maximální intenzitě.

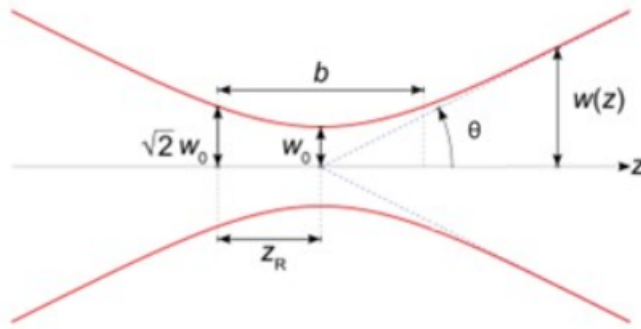
Velikost stopy pole lze určit pomocí CCD kamery. Měření probíhá ve vzdáleném poli (far field), které je definováno jako oblast, nacházející se ve vzdálenosti výrazně větší, než je Rayleighova vzdálenost z_0 . Určení stopy pole podle následující metody vychází z předpokladu, že profil optického svazku lze

popsat gaussovskou funkcí - jedná se o gaussovský svazek. Ze získaných dat se určí maximální intenzita svazku. Poloměr stopy pole pak odpovídá radiální vzdálenosti od osy svazku, kde intenzita svazku poklesne na násobek e^{-2} maximální intenzity.

Je třeba zmínit, že přesnost této metody závisí na rozlišení CCD čipu kamery. Měření profilů úzkých svazků je omezeno nízkým rozlišením kamery (velikostí pixelu).

3.1.2 Divergence svazku

Rozbíhavost neboli divergence svazku je parametr, který popisuje, jak rychle se svazek rozšiřuje v závislosti na vzdálenosti ve směru šíření. Vývoj stopy pole lze popsat hyperbolicou funkcí. Úhel, který svírají asymptoty této hyperboly vůči ose svazku, je pak definován jako divergenční úhel svazku θ .



Obrázek 3.2: Podélný řez nejužšího místa gaussovského svazku (fokusu) s vyznačenými parametry [17].

Divergence je závislá na definici MFD. Pokud uvažujeme gaussovské svazky, kde je stopa pole definována pomocí násobku e^{-2} maximální intenzity pole, lze divergenční úhel stanovit pomocí následujícího vztahu [18]:

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (3.2)$$

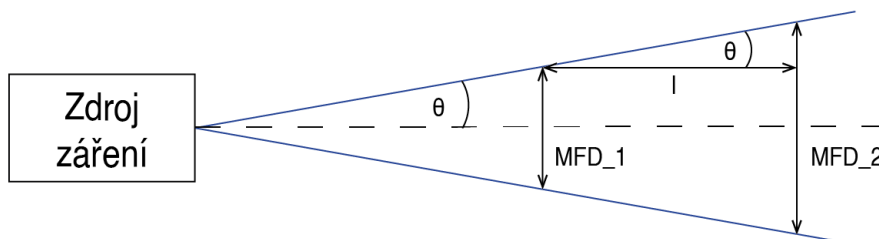
kde λ je vlnová délka světla, w_0 je pološířka nejužšího místa svazku, viz obrázek 3.2. a M^2 je parametr udávající kvalitu svazku. Faktor M^2 je vždy větší než 1, pokud $M^2 = 1$ jedná se o ideální gaussovský svazek. Divergence svazku je také často v simulačních prostředích a literatuře definována pomocí poloměru svazku w_0 . Svazky s malou divergencí jsou označovány jako kolimované svazky.

Pro měření divergence optického svazku jsou zde vybrány dvě metody, které se jeví jako vhodné pro aplikaci v rámci simulační studie a praktické části této práce.

První metoda využívá odečtu stopy pole ve dvou (a více) různých vzdálenostech, viz obrázek 3.3. Z rozdílu stopy pole lze poté stanovit divergenci svazku podle následujícího vztahu [20]:

$$\theta = \arctan\left(\frac{MFD_2 - MFD_1}{2l}\right), \quad (3.3)$$

kde θ je hledaná divergence, MFD_1 a MFD_2 jsou změřené stopy pole a l je vzdálenost mezi pozicemi, kde proběhl odečet stop pole.



Obrázek 3.3: Schéma měření divergence.

U druhé metody je před CCD kameru umístěna spojná čočka se známou ohniskovou vzdáleností. Čočka je zároveň natočena v souladu s maximálním potlačením sférických aberací [34]. Čip CCD kamery je poté umístěn do ohniska této čočky. Po odečtení stopy pole z kamery lze divergenci dopočítat podle následujícího vztahu [19]:

$$\theta = \arctan\left(\frac{MFD}{f}\right), \quad (3.4)$$

kde MFD je stopa pole fokusovaného svazku na čip CCD kamery a f je ohnisková vzdálenost použité čočky.

■ 3.1.3 Vložný útlum

Parametr definovaný jako vložný útlum (insertion loss, IL), je druh útlumu, který vzniká vložením pasivní komponenty do optického systému. Jeho velikost je určena následujícím vztahem [32]:

$$IL = 10 \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right), \quad (3.5)$$

kde P_{in} je výkon vstupující do optického systému a P_{out} je výkon vystupující z optického systému. Jednotkou této veličiny jsou decibely. Zdrojem útlumu může být samotná komponenta, nebo nedokonalá optická vazba vložené komponenty se zbytkem systému [32]. Vazba může být například ovlivněna nedokonalostmi na čelních stěnách spojovaných vláken, nebo rozdílem stop pole jednotlivých vláken.

V rámci praktické části je IL vybraných komponent a části systému měřen dvoufázovou metodou. V první fázi není samotná měřená komponenta zapojena. Měří se jen referenční úroveň výkonu na výstupu trasy P_{ref} [dBm]. V druhé fázi je do optického systému komponenta již zapojena a je provedeno opětovné přeměření na výstupu trasy P_{out} [dBm]. Velikost vloženého útlumu v dB je pak určena pomocí následujícího vztahu:

$$IL = P_{ref} - P_{out}. \quad (3.6)$$

■ 3.1.4 Testování kvality datového přenosu

V optických systémech je velikost BER závislá na poměru signálu vůči úrovni šumu - SNR (signal-to-noise ratio), respektive na ztrátách systému a případně na disperzi. Významnou roli hrají také nelineární jevy. K testování BER může být využito speciální zařízení označované jako bit error rate tester (BERT), ke kterému je připojen vstup a výstup zkoumaného optického systému. Analýza probíhá na základě přenosu pseudonáhodné bitové sekvence a následném vyhodnocení chybovosti přenosu [33].

Kapitola 4

Návrh FSO spoje

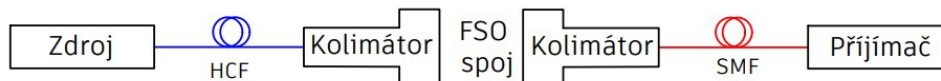
Cílem práce je navrhnout a experimentálně otestovat hybridní optický spoj, jehož součástí je i FSO spoj, kde na vstupní části FSO spoje je mnou navržený HCF kolimátor. Přijímací část je pak skrze konvenční kolimátor navázána na konvenční SMF. Motivací k tomuto řešení je otestování nové technologie HCF pro využití v FSO spojích. Benefitem tohoto řešení je zachování nízké latence signálu jak ve vstupním HCF, tak skrze celý FSO spoj. Signál se tak de facto šíří jen vzduchem pro který je rychlost šíření signálu o 50% vyšší než pro šíření křemenným sklem [24].

Následující podkapitoly budou věnovány popisu hybridního optického spoje a návrhu HCF kolimátoru.

4.1 Popis spoje

Navržený hybridní optický spoj vychází ze standardních FSO spojů popsaných v kapitole 3 s tím rozdílem, že vlákno vstupující do vysílací části je HCF. Jelikož se optický svazek vystupující z HCF chová odlišně od svazku vystupujícího ze SMF, je nutné uzpůsobit tomuto faktu návrh konstrukce kolimátoru. Návrh HCF kolimátoru je popsán podrobněji v následující podkapitole.

Jako přijímací část je využit konvenční dvoučočkový kolimátor se známými parametry. Celý hybridní optický spoj je schématicky znázorněn na obrázku 4.1. V rámci návrhu se počítá s délkou FSO části mezi vysílačem do jednotek metrů. Spoj je navržen na vlnové délce 1550 nm.



Obrázek 4.1: Schéma navrhovaného hybridního optického spoje využívajícího jako vstupní vlákno HCF.

4.2 Možnosti vazby HCF do FSO

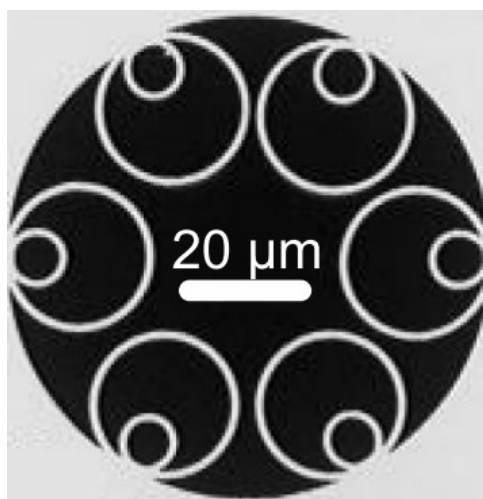
V rámci vazby HCF s FSO částí hybridního optického systému je potřeba v oblasti za koncem HCF dále upravit parametry svazku opouštějícího vlákno.

Kapitola 5

Charakterizace HCF

V rámci návrhu hybridního optického spoje byl vybrán typ HCF využívající principu antirezonance (ARF), speciálně struktura s dvojitými rezonátory NANF. Prvním důvodem je velká šířka pásma NANF. Dále tento NANF vykazuje nejnižší měrný útlum (v rámci HCF). Jedná se také o typ struktury, na kterou je nyní soustředěna velká část současného výzkumu problematiky HCF. Vznikají tak novější generace NANF se stále se zlepšujícími přenosovými vlastnostmi. NANF strukturu lze považovat jako nevíce perspektivní variantu pro možnou aplikaci v komerčním sektoru.

Zvolené vlákno pro uskutečnění experimentu je konstrukce NANF s šesti dvojitými kruhovými rezonátory, konstrukce vlákna je k nalezení na obrázku 5.1. MFD je 29,1 μm . Měrný útlum vlákna je menší než 1 dB/km. Dominantní vid je vzhledem ke struktuře pláště vlákna hexagonálně symetrický. Velikost divergence byla experimentálně stanovena na 1,705°. Zevrubnější popis měření je k nalezení v podkapitole 5.2.



Obrázek 5.1: Geometrie vlákna typu NANF. Obrázek je převzat z:[23] [upraveno].

Jelikož se geometrie HCF vláken neustále vyvíjí, tak není v tomto odvětví zatím stanoven žádná standard rozměrů jader vláken. Díky odlišným rozměrům MFD u HCF oproti SMF, nelze HCF jednoduše zapojit do již existujících vláknově-optických systémů. Při jakékoliv vazbě mezi SMF a HCF je zapotřebí

mezi vlákna umístit prvek, který slouží k přizpůsobení MFD. Možným řešením je navaření krátkého segmentu vícevidového GRIN vlákna na konec SMF. Uvnitř GRIN vlákna dochází k periodickému zvětšování a zmenšování MFD procházejícího svazku. Největšího průměru MFD na výstupní stěně vlákna je dosaženo, když délka vlákna odpovídá čtvrtině zmíněné periody [14] [15]. Délka segmentu je vždy specifická vůči velikostem MFD SMF a HCF vláken. Pro uskutečnění experimentu, který je součástí praktické části této práce bylo zapotřebí stanovit optimální délku tohoto GRIN segmentu, dále označovaného jako MFD adaptér. HCF vykazovalo MFD 29,1 μm a SMF vykazovalo MFD 10,2 μm . Popisu optimalizace délky MFD adaptéru a jeho výrobě se věnuje následující podkapitola.

■ Použité přístroje

Zdroj záření laditelný laser CoBrite DX4 (6-16 dBm, FWHM 100 kHz); Optický zesilovač Kneopsys KPS-BT2-C; powermeter Thorlabs PM100D s detektory S122C a S154C; OSA Yokogawa AQ6370C; kamera Gentec Beamage-4M-IR; Děliče Opneti 50/50; filtr Opneti, central wavelength 1550 nm, passband 10 nm; SMF s MFD 10,2 μm ; HCF NANF, MFD 29,1 μm ; mikrometrické a rotační posuvy; automatizovaný leštící systém KrellTech NOVATM; binokulární optický mikroskop; tlustostěnné kapiláry; UV tvrditelné lepidlo.

■ 5.1 Optimalizace a výroba MFD adaptéru

■ Výroba MFD adaptéru

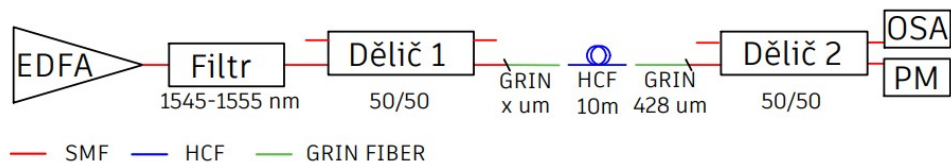
Přesné délky MFD adaptéru jsem dosáhl jeho postupným několikafázovým zbrusováním/leštěním pomocí automatizovaného leštícího systému NOVATM. Před samotným zbrusováním byl MFD adaptér včetně konce SMF vlepen do tlustostěnné skleněné kapiláry pro zvýšení robustnosti komponenty a zjednodušení manipulace, viz obrázek 5.3(b).

Při zbrusování MFD adaptéru společně s tlustostěnnou kapilárou je odstraňován materiál z čela kapiláry tak i z GRIN segmentu. Míra odebraného materiálu se reguluje pomocí tlaku jakým je MFD adaptér k brusnému papíru přitlačen. Délku MFD adaptéru jsem v průběhu broušení pravidelně kontroloval pod binokulárním optickým mikroskopem. Optimalizované MFD adaptéry délky 440 μm byly následně pokryty antireflexní vrstvou pro rozmezí vlnových délek 1530 až 1565 nm. Antireflexní vrstva zlepší průchod signálu, respektive sníží ztráty o 0,16 dB (pro přechod křemenné sklo vzduch).

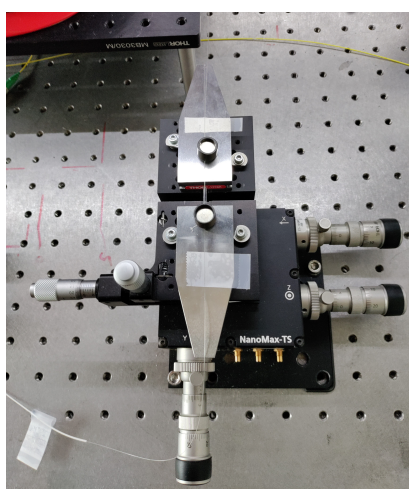
■ Optimalizace délky MFD adaptéru

Optimalizace délky MFD adaptéru vycházela ze znalosti jeho optimální délky pro NANF s podobným MFD a vnitřní strukturou. Tuto délku jsem uvažoval jako výchozí bod a dále připravil 6 dalších vzorků MFD adaptéru (s odlišnými délkami GRIN vlákna) a provedl jejich měření. Tímto jsem stanovil trend

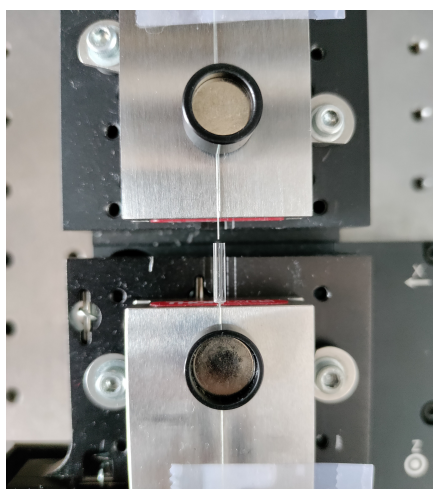
kvality vazby v závislosti na délce segmentu GRIN vlákna. Kvalita vazby byla stanovena na základě IL při vložení 10 m úseku HCF, které bylo do zbytku systému navázáno pomocí dvou MFD adaptéru, viz schéma na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Schéma systému na určení optimální délky segmentu GRIN vlákna. EDFA: erbiem dopovaný vláknový zesilovač, OSA: optický spektrální analyzátor, PM: měřič optického výkonu.



(a) : 5D mikroposuv.



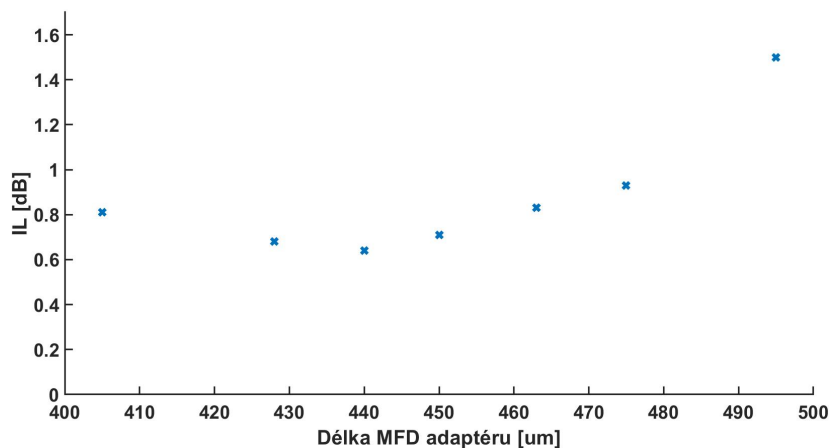
(b) : Detail navázání mezi SMF a HCF.

Obrázek 5.3: Navázání HCF na SMF.

V měření nebylo HCF se SMF pevně spojeno. Vazby bylo dosaženo těsným přiblížením a přesným zarovnáním konců obou vláken (konec SMF navíc opatřen o MFD adaptér), viz obrázek 5.3(b). Samotnému měření kvality vazby předcházelo referenční měření systému, do kterého byl úsek HCF zapojen. Systém je obdobný jako na obrázku 5.2 jen s tím rozdílem, že Dělič 1 a dělič 2 jsou přímo spojeny úsekem SMF. Výkon širokopásmového zdroje EDFA byl nastaven na 10,5 dBm. Za zdroj byl zařazen filtr o rozmezí vlnových délek 1545 až 1555 nm. Úroveň výkonu na výstupu filtru byla -1,4 dBm. Změřený výkon na výstupu systému, který sloužil jako reference, byl -7,6 dBm. Spektrum na výstupu je k nalezení na obrázku 5.5 a je označeno jako reference.

Po změření reference byl úsek SMF mezi Dělič 1 a 2 přerušen. K rozpojeným koncům SMF byly přivařeny nové úseky SMF jejichž konce byly opatřeny krátkými segmenty GRIN vláken (MFD adaptéry), viz schéma na obrázku 5.2. Ke vstupu HCF byl umístěn MFD adaptér, jehož délku bylo cílem optimalizovat. Za výstup HCF byl umístěn MFD adaptér délky 428 μm , který nebyl přímo pro toto vlákno optimalizován, ale vykazoval dostatečnou

kvalitu, aby posloužil jako referenční. Následovalo přesné přiblížení a zarovnání konců vláken na 5D mikroposuvech (XYZ, $2\times$ úhel), viz obrázek 5.3(a). Kvalita vazby byla sledována pomocí powermeteru na konci optické cesty. Cílem bylo na výstupu dosáhnout výkonu co nejvíce se blížícího referenční hodnotě. Průběh IL v závislosti na délce zkoumaného segmentu GRIN vlákna pro zvolené HCF je k nalezení na obrázku 5.4. Optimální délka MFD adaptéru pro zvolené HCF byla $440\ \mu\text{m}$.



Obrázek 5.4: Závislost IL na délce MFD adaptéru.

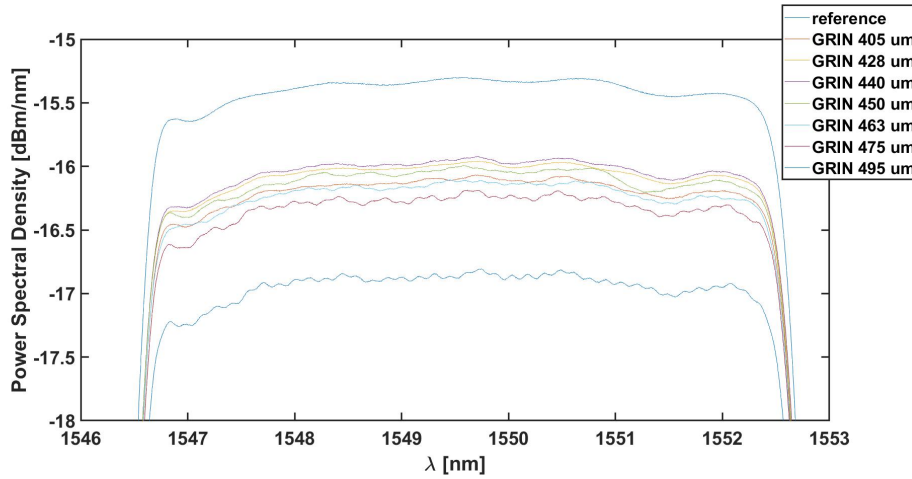
Použité HCF mělo délku 10 m. Při použití takto krátkého úseku HCF, nemusí dojít k dostatečnému utlumení HOMs. Z tohoto důvodu byl výstupní signál podroben spektrální analýze. U signálu byl pozorován odstup hladiny výkonu od referenční hodnoty napříč celým spektrem. Dále byla ve spektru kontrolována přítomnost HOMs. Jelikož se optické dráhy HOMs liší od optické dráhy dominantního vidu, dojde k interferenci, která se projeví jako zvlnění ve spektru, viz obrázek 5.5. [16] [14]. Perioda těchto oscilací je úměrná zpoždění HOMs oproti dominantnímu vidu [15].

5.2 Měření divergence svazku opouštějícího HCF

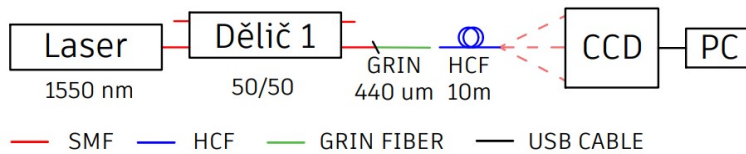
Měření divergence HCF jsem realizoval pomocí metody odečtu MFD v několika různých vzdálenostech (viz sekce 3.1.2). K odečtu MFD sloužila CCD kamera Gentec Beamage-4M-IR uzpůsobená ke snímání na vlnových délkách odpovídajících infračervené části spektra. Jako zdroj byl použit laser Cobrite s centrální vlnovou délkou 1550 nm. Velikost výkonu byla nastavena na 12 dBm. Vstup HCF byl ke zbytku systému navázán pomocí MFD adaptéru délky $440\ \mu\text{m}$. Za výstupem HCF se měřila divergence opouštějícího svazku. Blokové schéma systému je k nalezení na obrázku 5.5.

Měření probíhalo v 5 krocích, kdy první odečet MFD byl proveden v relativně těsné vzdálenosti od konce HCF (přesto se jednalo o oblast far-field). Z pěti odečtů velikostí MFD lze stanovit 4 velikosti divergence podle vztahu

3.4. Velikost kroku mezi odečty MFD byla 1 cm. Naměřené hodnoty jsou k nalezení v tabulce 5.1. Průměrná velikost divergence svazku byla stanovena na $1,705^\circ$.



Obrázek 5.5: Spektra měřená na výstupu systému pro jednotlivé délky MFD adaptérů.



Obrázek 5.6: Schéma měřícího zapojení pro určení divergence optického svazku vystupujícího z HCF. CCD: Charge-coupled device (čip kamery použitý pro snímání svazku), PC: zpracování dat.

Tabulka 5.1: Měření divergence svazku opouštějícího samotné HCF

l [cm]	MFD _x [μm]	MFD _y [μm]	Průměr MFD [μm]	divergence [°]
0	3240	3200	3220	
1	3760	3870	3815	1,704
2	4280	4490	4385	1,632
3	4870	5050	4960	1,647
4	5450	5750	5600	1,833

Kapitola 6

Simulace

Simulace jsem realizoval v prostředí OpticStudio™ Zemax, konkrétně v ne-sequenčním režimu. Jedná se o režim, kdy je do optického systému vpuštěn definovaný počet paprsků. Následně je možné pozorovat a vyhodnocovat, jak různé komponenty s paprsky interagují a mění jejich trajektorii. U všech simulací bylo použito 10^6 paprsků. Profil svazku byl monitorován pomocí funkce Detector viewer, viz obrázek 6.1. Vlnová délka byla nastavena na 1550 nm.

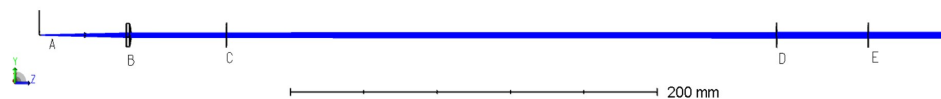
6.1 Simulace odečtu MFD a divergence

Předmětem simulace byl HCF kolimátor tvořený planokonvexní čočkou s ohniskovou vzdáleností 30 mm (Thorlabs, LA1700-C) a 50 mm (Thorlabs, LA1213-C). Čočky měly průměry 6 mm a 12,7 mm. Přední i zadní stěny čoček byly opatřeny antireflexní vrstvou. Čočky byly stejně jako v návrhu a realizaci spoje natočeny planární stranou ke zdroji svazku (konci HCF). V simulaci bylo vlákno nahrazeno zdrojem gaussovského svazku o stejných parametrech. Zdroj vyzařoval svazek s MFD o velikosti $29,1 \mu\text{m}$ a divergencí $1,705^\circ$. Nastavení parametru divergence zdroje proběhlo na základě experimentálně změřené rozbíhavosti svazku vlákna použitého při měření.

6.2 Výstup simulace odečtu MFD divergence planokonvexních čoček

Rozbíhavost svazku po průchodu kolimačními čočkami LA1700-C a LA1213-C byla stanovena pomocí metody srovnávání MFD popsané v sekci 3.1.2. MFD byl určen z parametru RMS Spot Radius odpovídajícímu polovině MFD. RMS Spot Radius je parametr, který v prostředí Zemax vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu poloměru svazku.

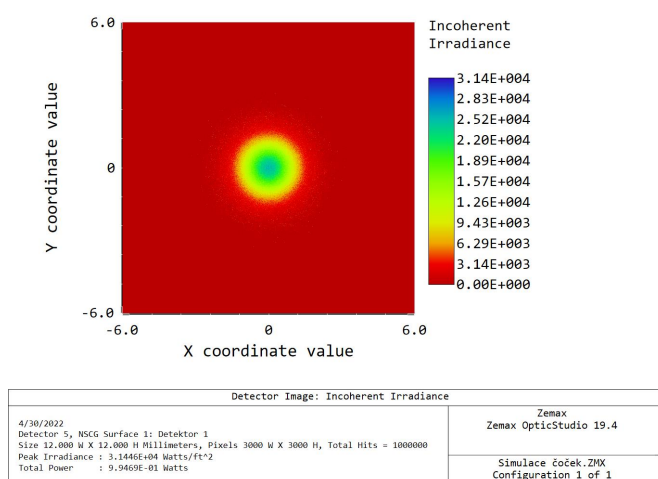
Divergence kolimovaného svazku stanovená pomocí metody srovnávání MFD pro čočku LA1700-C na vlnové délce 1550 nm podle vzorce 3.4 byla $0,037^\circ$. Divergence pro čočku LA1213-C na stejné vlnové délce byla $0,041^\circ$. Lze konstatovat, že rozdíl divergence je mezi oběma čočkami minimální.



Obrázek 6.1: Schéma simulace jednotlivých parametrů. A) Zdroj gaussovského svazku B) Čočka C) Detector viewer na určení MFD ve vzdálenosti 5 cm od čočky E) a F) Detector viewers na vyhodnocení divergence z rodílu MFD.

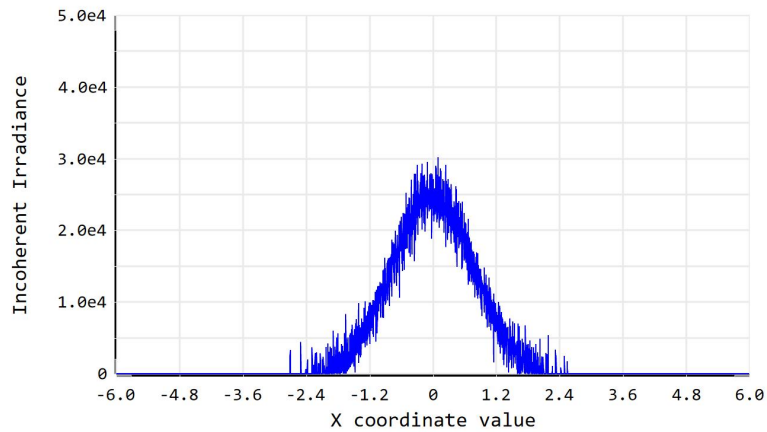
Dalším klíčovým parametrem pro svazek vstupující do FSO části systému je jeho MFD za kolimující čočkou vysílače. Střední kvadratická hodnota poloměru svazku za výstupní stěnou čočky byla změřena ve vzdálenosti 5 cm od výstupní stěny čočky. Je tomu tak z důvodu, že při měření MFD v praktické části nelze z konstrukčních důvodů čip kamery umístit do těsné vzdálenosti za čočkou. Velikost střední kvadratické hodnoty poloměru svazku ve vzdálenosti 5 cm od čočky LA1700-C byla 0,665 mm. Pro čočku LA1213-C byla tato velikost 1,086 mm, viz obrázky 6.2 až 6.3. Lze konstatovat, že střední kvadratické hodnoty poloměrů svazků se liší. Výraznější rozšíření svazku poskytuje čočka LA1213-C.

Z důvodu značné citlivosti divergence svazku na přesné umístění zdroje do ohniska, lze konstatovat, že obě čočky svazek kolimují velice obdobně. Při uvážení stejné vzdálenostní odchylky od ohniska obou čoček se u čočky LA1213-C navíc celkově dopouštíme relativně menší chyby vůči ohniskové vzdálenosti. Výhodou čočky LA1213-C je dále také její výraznější rozšíření svazku opouštějícího HCF. Dalším benefitem čočky LA1213-C oproti LA1213-C je z konstrukčního hlediska její vnější průměr, který je přímo kompatibilní s tubusovými modulárními systémy Thorlabs s vnitřním průměrem 12,7 mm. Čočku LA1700-C je zapotřebí navíc opatřit kovovým adaptérem z 6 mm na 12,7 mm. S přihlédnutím ke zmíněným skutečnostem jsem se rozhodl pro konstrukci spoje vybrat čočku LA1213-C.



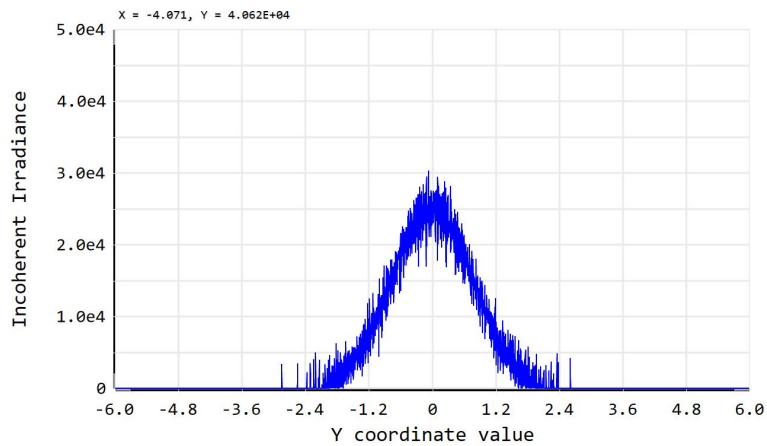
Obrázek 6.2: Graf vývoje intenzity záření v příčném směru ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.

6.2. Výstup simulace odečtu MFD divergence planokonvexních čoček



Incoherent Irradiance	
4/30/2022 Detector 5, NSCG Surface 1: Detektor 1Row Center, Y = 0.0000E+00 Size 12.000 W X 12.000 H Millimeters, Pixels 3000 W X 3000 H, Total Hits = 1000000 Peak Irradiance : 3.1446E+04 Watts/ft^2 Total Power : 9.9469E-01 Watts	Zemax Zemax OpticStudio 19.4 Simulace čoček.ZMX Configuration 1 of 1

Obrázek 6.3: Graf vývoje intenzity záření v příčném směru x ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.



Incoherent Irradiance	
4/30/2022 Detector 5, NSCG Surface 1: Detektor 1Column Center, X = 0.0000E+00 Size 12.000 W X 12.000 H Millimeters, Pixels 3000 W X 3000 H, Total Hits = 1000000 Peak Irradiance : 3.1446E+04 Watts/ft^2 Total Power : 9.9469E-01 Watts	Zemax Zemax OpticStudio 19.4 Simulace čoček.ZMX Configuration 1 of 1

Obrázek 6.4: Graf vývoje intenzity záření v příčném směru y ve vzdálenosti 5 cm za čočkou LA1213-C.

Kapitola 7

Konstrukce a experimentální ověření HCF kolimátoru

V této části se zprvu věnuji popisu konstrukce HCF kolimátoru tzn. jaké komponenty byly použity a jak byly vůči sobě navzájem umístěny. Následuje popis sestavení kolimátoru, kde prvním krokem bylo navázání HCF na SMF systém. Na to navazuje vysvětlení procesu umístění HCF do ohniska kolimátoru k čemuž simultánně probíhalo ladění FSO spoje délky 120 cm. Konstrukce kolimátoru jako komponenty byla završena fixací HCF v ohnisku čočky kolimátoru. Následovalo měření parametrů FSO spoje délky 120 cm. Poté byl systém přestaven na FSO spoj délky 30 cm a byla provedena další měření.

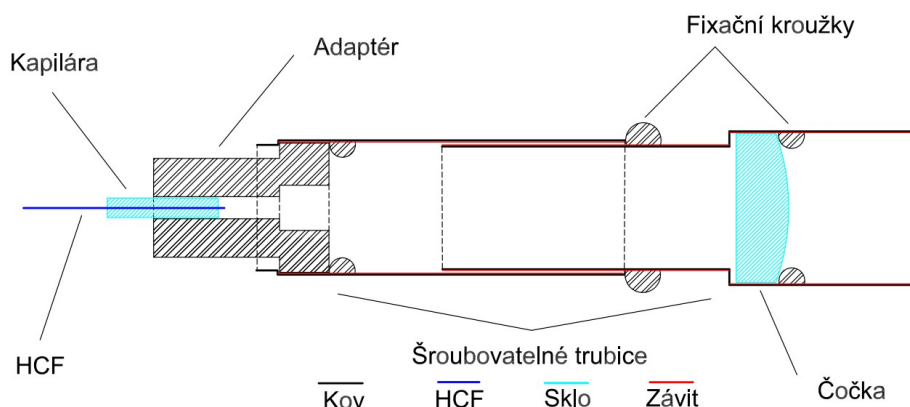
7.1 Použité přístroje

Zdroj záření laditelný laser CoBrite DX4 (6-16 dBm, FWHM 100 kHz); Optický zesilovač Kneopsys KPS-BT2-C; powermeter Thorlabs PM100D s detektory S122C a S154C; OSA Yokogawa AQ6370C; kamera Gentec Beamage-4M-IR; Děliče Opneti 50/50; filtr Opneti, central wavelength 1550 nm, passband 10 nm; SMF s MFD 10,2 μm ; HCF NANF, MFD 29 μm ; čočka Thorlabs 1213-C; trubicový systém Thorlabs SM05V10 a SM05L10; kolimátor Thorlabs F810APC-1550; tlustostěnné kapiláry; UV tvrditelné lepidlo.

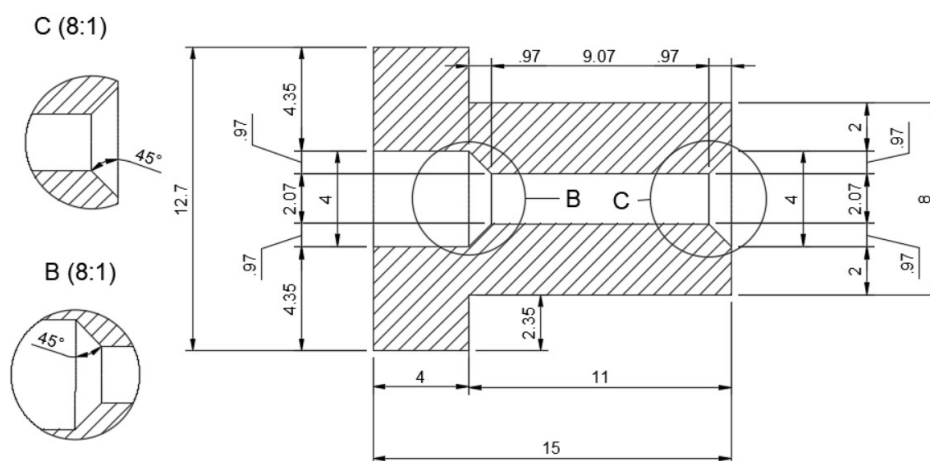
7.2 Popis konstrukce kolimátoru

Kolimátor jako komponenta je sestaven s využitím modulárního trubicového systému Thorlabs s vnitřním průměrem 12,7 mm, viz obrázek 7.1. Systém sestává z teleskopické části ve které je uvnitř uchycena planokonvexní čočka s $f = 50 \text{ mm}$ a průměrem 12,7 mm. Čočka je natočena planární stranou k HCF. Tato část se pomocí závitu zašroubovává do trubice ve které je uchycen adaptér na změnu průměru z 12,7 mm na 2,07 mm. V tomto adaptéru je vlepena tlustostěnná skleněná kapilára, ve které je vlepeno samotné HCF. Adaptér, který slouží k uchycení kapiláry s vláknem do trubice je vyrobený na CNC, jeho vnitřní průměr je 2,07 mm, viz obrázek 7.2. Teleskopická šroubovací část slouží k hrubému umístění HCF do ohniska čočky. K přesnému umístění

HCF do ohniska jak v příčném tak v podélném směru dochází na základě zasouvání tlustostěnné kapiláry do adaptéru a následném uchycení kapiláry v dané pozici pomocí UV tvrditelného lepidla. Pro experiment jsem využil HCF délky 10 m.



Obrázek 7.1: Schéma kolimátoru postaveném na modulárním trubicovém systému.

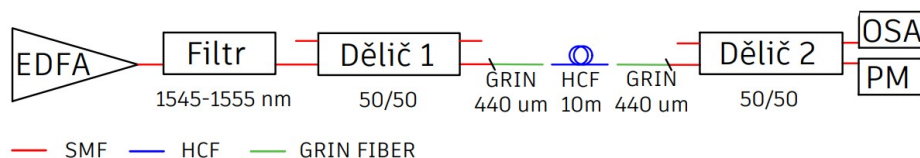


Obrázek 7.2: Schéma adaptéru z vnějšího průměru 12,7 mm na vnitřní průměr 2,07 mm. Uvedené rozměry na obrázku jsou v mm.

7.3 Výroba kolimátoru a ladění FSO spoje

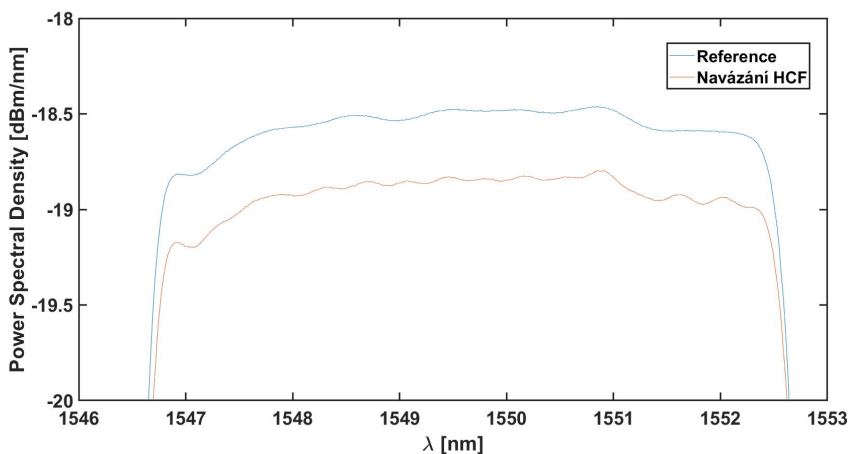
Prvním krokem je navázání 10 m úseku HCF ke stávajícím systémům v laboratoři uzpůsobených na SMF. K navázání byly využity dva optimalizované MFD adaptéry délek 440 μm . V experimentu nebylo HCF se SMF pevně spojeno. Vazby bylo dosaženo těsným přiblížením a přesným zarovnáním konců obou vláken (konec SMF navíc opatřen o MFD adaptér) na pohyblivých 5D mikroposuvech (XYZ, 2 \times úhel). Samotnému měření kvality navázání

předcházelo referenční měření systému, do kterého byl úsek HCF zapojen. Systém je obdobný jako na obrázku 7.3 jen s tím rozdílem, že Dělič 1 a 2 je přímo spojen úsekem SMF. Změřený výkon na výstupu systému, který sloužil jako reference, byl -7,9 dBm. Spektrum na výstupu je k nalezení na obrázku 7.4.



Obrázek 7.3: Schéma systému použitého při navázání HCF.

Změřený výkon na výstupu systému měl po zapojení a navázání HCF velikost -8,2 dBm, čemuž odpovídá IL navázání HCF do systému 0,3 dB. Jedná se o hodnotu které jsem při navazování s tímto typem vlákna a MFD adaptérem dosahoval opakovaně. Dále byla provedena spektrální analýza výstupního signálu. U signálu byl kontrolován odstup hladiny výkonu od referenční hodnoty napříč celým spektrem. Ve spektru bylo dále monitorováno zvlnění indikující vybudzení HOMs. Spektrum výstupního signálu je k nalezení na obrázku 7.4. S přihlédnutím k nízkému IL navázání HCF do systému a malému zvlnění ve spektru, lze konstatovat, že bylo dosaženo kvalitní vazby mezi SMF a HCF.



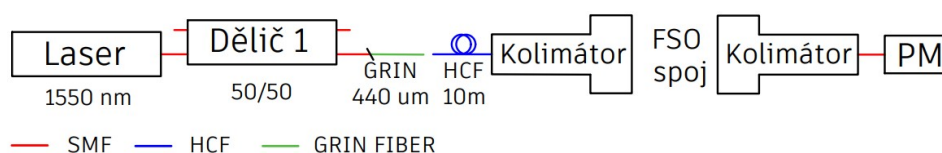
Obrázek 7.4: Spektra na výstupu systému při navazování HCF na SMF.

Po navázání HCF do systému a následném ověření kvality této vazby byl výstupní konec HCF odpojen a začala jeho příprava na vytvoření HCF kolimátoru.

V prvním kroku jsem odstranil přibližně 1,2 mm ochranného polymeru z pláště HCF z důvodu vlepění HCF do tlustostěnné kapiláry s vnitřním průměrem 0,266 mm, do které se vejde pouze holé HCF bez ochrany. Délka kapiláry byla 10 mm. Následně jsem zasunul HCF do kapiláry, tak aby jeho

konec kapiláry přesahoval přibližně o 2 mm a na druhé straně byla kapilára přisunuta až k ochrannému polymeru. Poté jsem zafixoval kapiláru pomocí UV tvrditelného lepidla. Lepidlo jsem aplikoval na vzdálenější konec kapiláry od konce HCF (oblast konce ochranného polymeru a začátek kapiláry), viz obrázek 7.6(a). Po 10 minutách bylo lepidlo vytvrzeno pomocí UV lampy.

Dalším krokem bylo sestavení HCF kolimátoru. Do modulárního trubicového systému jsem pomocí fixačních šroubovacích kroužků uchytil planokonvexní čočku a na druhém konci kovový adaptér sloužící na uchycení tlustostěnné kapiláry. Poté jsem přemístil kapiláru na 5D mikroposuv, kdy kapilára s HCF byla uchycena na polohovací část a trubicový systém na fixní část držáku. Konec HCF jsem naladil do ohniska čočky. K hrubému nastavení vzdálenosti sloužil závit modulárního trubicového systému. Přesného umístění konce HCF do ohniska čočky jsem dosáhl jemným posuvem kapiláry uvnitř adaptéru. Kvalita umístění konce HCF do ohniska byla posuzována pomocí druhého konvenčního kolimátoru (Thorlabs F810APC-1550), umístěného jako přijímací kolimátor do vzdálenosti 1,2 m, viz obrázek 7.5. Přijímací kolimátor byl umístěn na 5D mikroposuv.

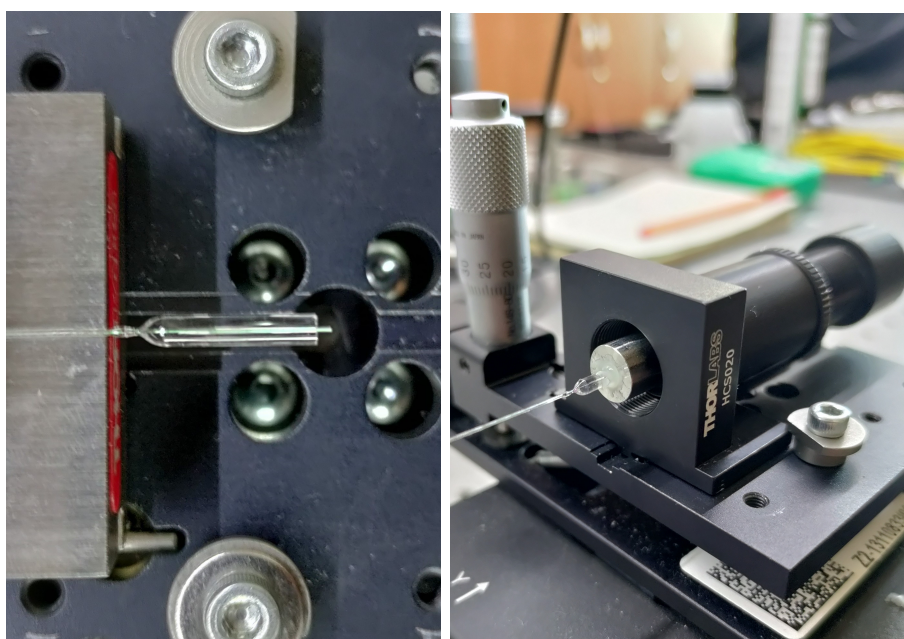


Obrázek 7.5: Schéma systému použitého při umístění HCF do ohniska kolimátoru a ladění FSO spoje. PM: power meter.

Na vstupu systému byl úzkopásmový laser Cobrite (centrální vlnová délka 1550 nm) s výkonem 8 dBm. Na výstupu přijímacího kolimátoru byl měřen výkon, viz obrázek 7.5. Cílem bylo optický výkon na výstupu maximalizovat.

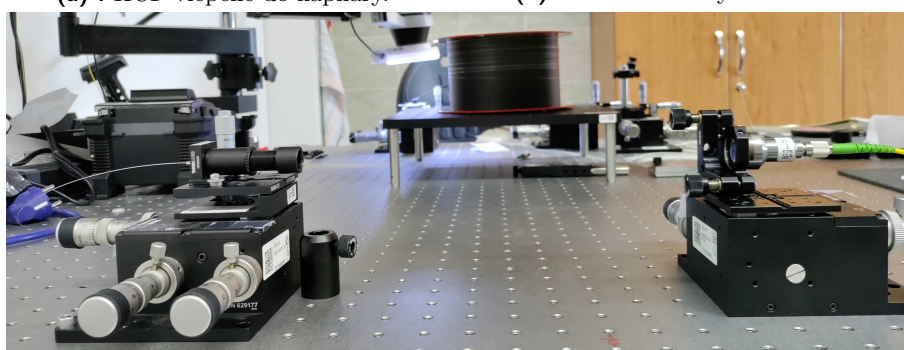
Pro dosažení maximálního výkonu na výstupu musely být oba kolimátory vůči sobě nejen pozičně a úhlově dobře naladěné, HCF kolimátor sloužící jako vysílač navíc musel svazek alespoň do jisté míry kolimovat. Při konstrukci kolimátoru byl tak zároveň laděn FSO spoj délky 1,2 m.

Po dosažení maximálního výkonu na výstupu (-9,4 dBm) byla přeměřena divergence kolimovaného svazku, jakožto kontrola, zda je svazek opravdu dobře kolimován. Po provedení měření divergence byla kapilára v adaptéru uchycena pomocí UV tvrditelného lepidla. Pro tuto aplikaci bylo vybráno lepidlo, které bylo výrazně méně tekuté oproti lepidlu použitému při lepení HCF do kapiláry. Bylo tomu z důvodu většího rozdílu mezi vnějším průměrem kapiláry a vnitřním průměrem adaptéru (70 μm rozdíl). S tekutějším lepidlem by bylo výrazně těžší dosáhnout dostatečné tloušťky vrstvy lepidla spojujícího dohromady kapiláru s adaptérem. Adaptér navíc disponoval konickým zkosením vstupní hrany v oblasti středního otvoru, viz obrázek 7.2. Lepidlo s vyšší viskozitou tak bylo mnohem výhodnější z hlediska manipulace. Tvrzení lepidla bylo posledním krokem výroby kolimátoru. Plně sestavený kolimátor je k nalezení na obrázku 7.6(b). Následně se už dalo s celým kolimátorem manipulovat jako s celkem.



(a) : HCF vlepené do kapiláry.

(b) : Plně sestavený kolimátor.



(c) : FSO spoj délky 30 cm.

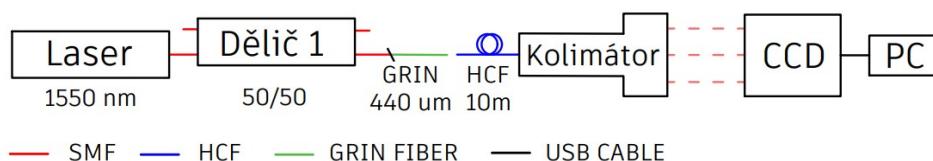
Obrázek 7.6: Obrázky pořízené při sestavování kolimátoru a ladění FSO spojů.

7.4 Měření parametrů hybridního optického spoje

Měření divergence optického svazku vystupujícího z HCF kolimátoru probíhalo pomocí metody odečtu MFD v několika různých vzdálenostech. K odečtu MFD sloužila CCD kamera Gentec Beamage-4M-IR uzpůsobená ke snímání na vlnových délkách odpovídajících infračervené části spektra. Metoda měření je přesněji popsána v části 3.1.2. Schéma systému je k nalezení na obrázku 7.7.

Odečet MFD probíhal v 5 krocích o délce kroku 5 cm. Z pěti kroků lze stanovit čtyři hodnoty divergence. Měření divergence svazku opouštějícího už plně zkonstruovaný a slepený HCF kolimátor bylo provedeno ve dvou oblastech. První oblast začínala na vzdálenosti přibližně 36 cm od čočky kolimátoru. V rámci tohoto měření byl výkon zdroje nastaven na 8 dBm.

Druhá oblast pak ve vzdálenosti přibližně 78,5 cm od čočky kolimátoru a výkon zdroje byl nastaven 10 dBm. Výsledky obou měření jsou k nalezení v tabulkách 7.1 a 7.2.



Obrázek 7.7: Schéma systému na měření divergence optického svazku vystupujícího z HCF kolimátoru.

Tabulka 7.1: Měření divergence s prvním měřením ve vzdálenosti 36 cm od kolimátoru

l [cm]	MFD_x [μm]	MFD_y [μm]	Průměr MFD [μm]	divergence [$^\circ$]
0	3660	3530	3595	
5	3820	3660	3740	0,083
10	4000	3750	3875	0,077
15	4080	3860	3970	0,054
20	4130	4090	4110	0,080

Tabulka 7.2: Měření divergence s prvním měřením ve vzdálenosti 78,5 cm od kolimátoru

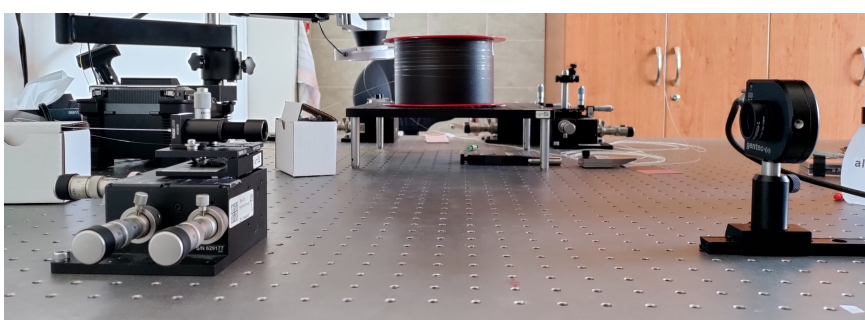
l [cm]	MFD_x [μm]	MFD_y [μm]	Průměr MFD [μm]	divergence [$^\circ$]
0	4460	4470	4465	
5	4700	4480	4590	0,072
10	4900	4610	4755	0,095
15	5090	4930	5010	0,146
20	5250	5000	5125	0,066

Průměrná velikost divergence svazku změřená v první oblasti byla $0,074^\circ$. Průměrná divergence v druhé oblasti byla $0,077^\circ$ (po vyřazení nejvyšší hodnoty). CCD kamera byla do vzdáleností odečtů MFD přesouvána ručně. Přesnost měření divergence by se dále dala zpřesnit použitím automatizovaného systému.

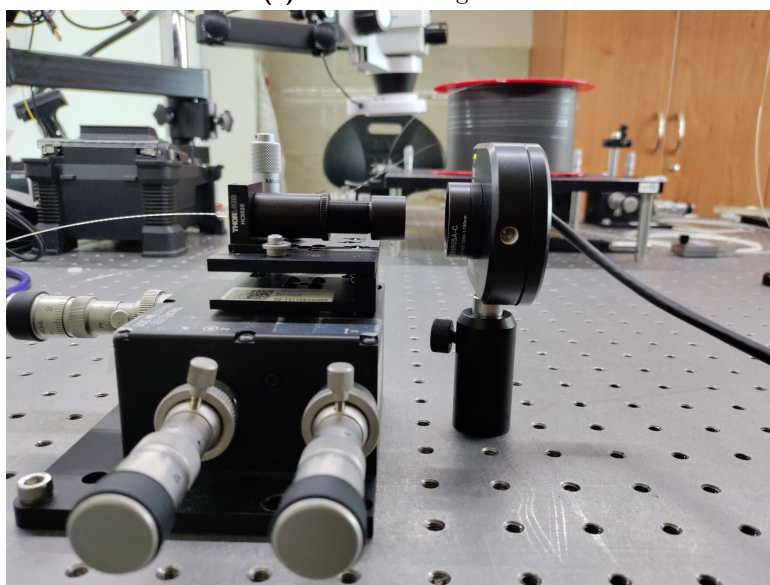
Dále bylo uskutečněno měření MFD svazku ve vzdálenosti 5 cm od kolimátoru navázaného na HCF. Při nastavení zdroje Cobrite na výkon 8 dBm byla změřena velikost MFD 2800 μm .

Dále byl pomocí měřiče optického výkonu ve vzdálenosti přibližně 2,5 cm od kolimátoru změřen výkon svazku vstupujícího do FSO části hybridního optického spoje. Změřená velikost výkonu byla 4,2 dBm při nastavení vstupního výkonu na zdroji Cobrite na 8 dBm. Při konstrukci kolimátoru byl zároveň sestaven i FSO spoj, o délce 1,2 m mezi vysílacím a přijímacím kolimátorem.

Na konci SMF připojeného k přijímači byl naměřen výkon $-9,4$ dBm. IL odpovídající FSO části systému a opětovné vazbě svazku z volného prostoru zpět do vlákna byl po odečtení rozdílů velikostí naměřených výkonů stanoven na $13,6$ dB. FSO spoj byl později přestaven na vzdálenost 30 cm mezi vysílačem a přijímačem a opětovně naladěn. Naměřený výkon na konci SMF připojeného k přijímači byl $-8,7$ dBm. IL odpovídající této vazbě byl $12,9$ dB. Z naměřených hodnot IL je patrné, že v experimentu docházelo ke značné ztrátě výkonu při opětovné vazbě svazku do SMF. Příčinou je zřejmě fakt, že se zpravidla FSO spoje navrhují jako reciproké systémy. Vysílací a přijímací kolimátor je koncipován na shodný svazek v FSO části. U mého experimentu tomu tak nebylo, jelikož jsem optimalizoval pouze kolimátor tvořící vysílač a jako přijímač byl využit konvenční kolimátor.



(a) : Měření divergence.



(b) : Měření MFD.

Obrázek 7.8: Měření parametrů svazku FSO spoje.

Kapitola 8

Datový přenos

Po kompletaci HCF kolimátoru a sestavení hybridního optického spoje s FSO částí o délce 120 a 30 cm jsem testoval reálný datový přenos. K vstupu a výstupu byl připojen 10 Gbit BER tester s non-return to zero (NRZ) on-off keying (OOK) datovým formátem, viz obrázek 8.1. Před vstupní dělič byl zařazen variabilní optický attenuátor (VOA).

8.0.1 Použité přístroje

Děliče Opneti 50/50 a 99/1; SMF s MFD 10,2 μm ; HCF NANF s MFD 29 μm ; kolimátor postavený na čočce Thorlabs 1213-C; kolimátor Thorlabs F810APC-1550; VOA; powermetry Thorlabs PM100D s detektory S154C; BERT Vepal TX300E.

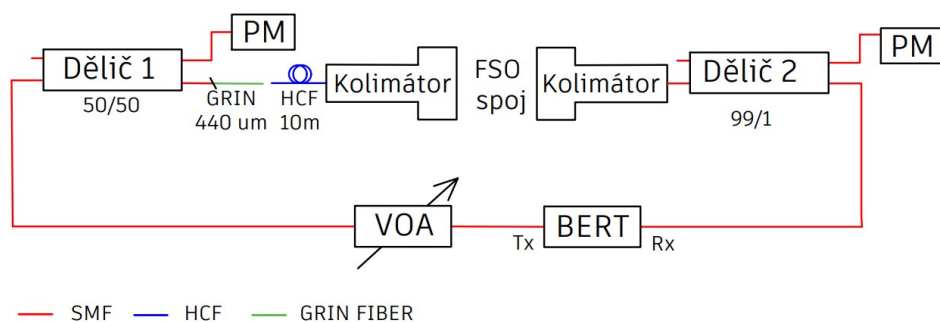
8.0.2 Měření BER a linearity systému

Měření BER probíhalo v závislosti na vloženém útlumu VOA. Úroveň optického výkonu byla monitorována nejprve na druhém výstupu vstupního děliče (50/50). Jednalo se tak de facto o měření úrovně optického výkonu vstupujícího do systému. Za druhé byl výkon monitorován za výstupem SMF kolimátoru na 1% portu monitorovacího děliče (99/1). Na 99% port monitorovacího děliče byl připojen BER tester.

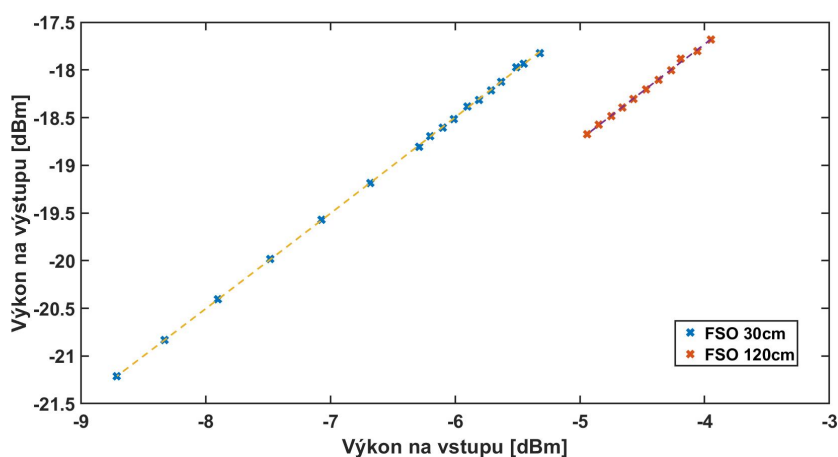
Porovnáváním úrovní výkonů na vstupu a výstupu FSO části byla ověřena linearita celého spoje. Závislosti výkonů pro oba FSO spoje jsou k nalezení na obrázku 8.2.

U FSO spoje délky 120 cm byl na VOA měněn útlum v rozmezí 0 až 1 dB s krokem 0,1 dB. Závislost BER na výstupním výkonu je k nalezení na obrázku 8.3.

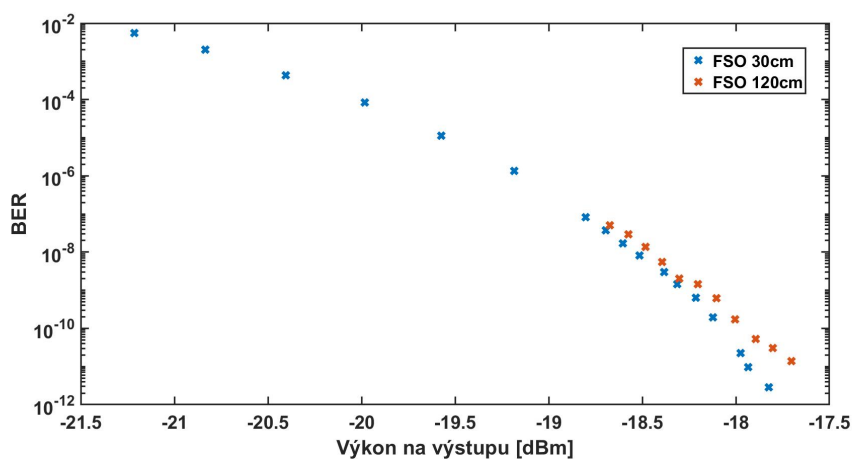
U spoje délky 30 cm byly uskutečněny 2 měření závislosti BER na vloženém útlumu. První měření opět probíhalo s krokem 0,1 dB, kdy počáteční útlum attenuátoru byl opět nastaven na 0. Pro rozmezí vložených útlumů 0 až 1,4 dB nabýval BER nulových hodnot. Zaznamenaný BER se vyskytoval až od vloženého útlumu 1,4 dB. Následovalo tak měření s krokem 0,1 dB pro rozmezí vložených útlumů 1,4 až 2,4 dB. Závislost BER na výstupním výkonu je k nalezení na obrázku 8.3.



Obrázek 8.1: Schéma systému použitého na měření BER.



Obrázek 8.2: Závislost výstupního optického výkonu na vstupním optickém výkonu.



Obrázek 8.3: Závislost BER na výstupním výkonu.

U spoje délky 30 cm bylo dále navázáno měřením počínající nastavením atenuátoru na útlum 2,4 dB a končící hraniční velikostí útlumu, při kterém byl

BER tester schopen chybovost přenosu ještě vyhodnotit. Bylo tak uskutečněno měření v rozmezí útlumů 2,4 až 4,8 dB s krokem 0,4 dB. Závislost BER na výstupním výkonu je k nalezení na obrázku 8.3. Závislost v grafu plynule navazuje na měření s krokem 0,1 dB.

Na nižších vložných útlumech lze konstatovat, že se oba FSO spoje chovají obdobně. U spoje délky 30 cm lze pozorovat oproti delšímu spoji nárůst minimálního nastaveného útlumu na VOA, kde je BER tester schopen chybovost teprve vyhodnotit. Je tomu zřejmě z důvodu menšího IL kratšího spoje oproti delšímu (12,9 dB a 13,6 dB). Měření BER při vysokých hodnotách útlumu VOA bylo provedeno spíše jako informativní, za účelem zjištění limitů do kterého je systém schopen data přenášet. Pro využití v telekomunikační a datové technice jsou už tak vysoké hodnoty BER nepřijatelné.

Kapitola 9

Závěr

V úvodních kapitolách práce jsem představil vybrané typy optických vláken s dutým jádrem a porovnal je s konvenčními telekomunikačními optickými vlákny. Dále jsem se věnoval rozboru parametrů volnosvazkových spojů a jejich adaptaci pro napojení s optickými vlákny s dutým jádrem.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout hybridní optický spoj, který staví na výhodách šíření optického signálu ve vzduchu, ať už ve vláknech s dutým jádrem či v rámci volnosvazkového spoje. K tomuto bylo nezbytné navrhnout, simulovat a zkonstruovat kolimátor navázaný na optické vlákno s dutým jádrem.

Pro řešení jsem zvolil kolimaci pomocí planokonvexní čočky. Na základě simulačních výstupů jsem zvolil čočku Thorlabs LA1213-C, která poskytovala v simulačním modelu divergenci $0,041^\circ$ a střední kvadratická hodnota poloměru svazku ve vzdálenosti 5 cm za výstupní stěnou čočky byla 1,086 mm.

Jako mezikrok jsem zkonstruoval adaptér stopy pole pro přechod mezi konvenčním jednovidovým optickým vláknem a optickým vláknem s dutým jádrem. Konkrétně jsem se zaměřil na vlákno typu NANF (antirezonanční vlákno s dvojitým rezonátorem). Zde jsem optimalizoval délku segmentu gradientního mnohavidového optického vlákna pomocí metody minimalizace ztrát vazby a stanovil optimální délku na 440 μm . Daný adaptér stopy pole jsem pak zhotovil v šesti kusech. Adaptér byl opatřen antireflexní vrstvou.

Následovala charakterizace vlákna typu NANF z ohledu divergence svazku na výstupu vlákna. Divergence byla stanovena na $1,705^\circ$ a spolu s velikostí stopy pole byla dále využita jako vstupní parametr pro provedení simulační studie.

V praktické části jsem poté demonstroval funkčnost mnou navrženého a zkonstruovaného kolimátoru tvořeného planokonvexní čočkou s ohniskovou vzdáleností 50 mm (LA1213-C) navázanou na vlákno typu NANF. Na základě tohoto kolimátoru jsem sestavil dva volnosvazkové spoje délek 120 a 30 cm. Vložný útlum volnosvazkového spoje délky 30 cm byly 13,6 dB. Spoji délky 120 cm odpovídal vložný útlum 12,9 dB. Značný útlum je způsobený kolimátorem pro konvenční jednovidové vlákno.

Dále jsem provedl charakterizaci divergence kolimovaného svazku na výstupu HCF kolimátoru, průměrovaná divergence byla $0,076^\circ$. Stopa pole ve vzdálenosti 5 cm od výstupu HCF kolimátoru byla 2,8 mm.

Dále byl uskutečněn datový přenos skrze oba FSO spoje. V této části byl testován BER v závislosti na vložném útlumu. U kratšího spoje bylo uskutečněno měření až po maximální velikost vložného útlumu 4,8 dB, kdy byl BER tester schopen chybovost přenosu ještě vyhodnotit.

Výsledky měření odpovídají simulačním předpokladům. Navržený kolimátor pro optické vlákno s dutým jádrem poskytuje dostatečný stupeň kolimace pro vytvoření volnosvazkového spoje v řádu metrů. Vložný útlum finálního kolimátoru je zanedbatelný a lze tedy konstatovat, že se povedlo zhotovit přenositelný, hermetický kolimátor pro využití ve volnosvazkových spojích na bázi vláken s dutým jádrem

V blízké budoucnosti se chci zaměřit na realizaci volnosvazkového spoje, kde bude jak vysílací, tak i přijímací kolimátor navázaný na optické vlákno s dutým jádrem. V systému by tak byly využity plně optimalizované kolimátory, což by značně snížilo ztráty volnosvazkového spoje. Po zapojení delších úseků vláken s dutým jádrem by byl tento systém vhodný pro demonstraci nízké latence oproti obdobným systémům postavených na konvenčních vláknech. Dalším zajímavým tématem je výzkum volnosvazkových spojů v kombinaci s vlákny s dutým jádrem na vlnových délkách v oblasti okolo 2000 nm.



Literatura

- [1] POLETTI, Francesco, Marco N. PETROVICH a David J. RICHARDSON. *Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications*. *Nanophotonics* [online]. 2013, 2(5-6), 315-340 [cit. 2021-12-07]. ISSN 2192-8614. Dostupné z: doi:10.1515/nanoph-2013-0042
- [2] JASION, Gregory T, Thomas D BRADLEY, Kerriane HARRINGTON, et al. *Hollow Core NANF with 0.28 dB/km Attenuation in the C and L Bands: technology and applications*. *Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2020* [online]. Washington, D.C: OSA, 2020, 2020, 2(5-6), Th4B.4- [cit. 2021-12-07]. ISBN 978-1-943580-75-0. ISSN 2192-8614. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2020.Th4B.4
- [3] ROBERTS, P. J., F. COUNY, H. SABERT, et al. *Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres: technology and applications*. *Optics Express* [online]. Washington, D.C: OSA, 2005, 2020, 13(1), Th4B.4- [cit. 2021-12-07]. ISBN 978-1-943580-75-0. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OPEX.13.000236
- [4] TAMURA, Yoshiaki, Hirotaka SAKUMA, Keisei MORITA, et al. *The First 0.14-dB/km Loss Optical Fiber and its Impact on Submarine Transmission*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2018, 36(1), 44-49 [cit. 2022-01-11]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2018.2796647
- [5] KOMANEC, M., D. DOUSEK, D. SUSLOV a S. ZVANOVE. *Hollow-Core Optical Fibers*. *Radioengineering* [online]. 2020, 29(3), 417-430 [cit. 2022-01-12]. ISSN 1210-2512. Dostupné z: doi:10.13164/re.2020.0417
- [6] ATKIN, D.M., T.J. SHEPHERD, T.A. BIRKS, P.St.J. RUSSELL a P.J. ROBERTS. *Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures*. *Electronics Letters* [online]. 1995, 31(22), 1941-1943 [cit. 2022-01-12]. ISSN 0013-5194. Dostupné z: doi:10.1049/el:19951306
- [7] RUSSELL, Philip St.J. *Photonic-Crystal Fibers*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2006, 24(12), 4729-4749 [cit. 2022-01-12]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2006.885258

- [8] ROBERTS, P. J., F. COUNY, H. SABERT, et al. *Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres*. Optics Express [online]. 2005, 13(1) [cit. 2022-01-12]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OPEX.13.000236
- [9] Multimode fibers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/multimode_fibers.html
- [10] Brillouin Scattering. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/brillouin_scattering.html
- [11] Raman Amplifiers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/raman_amplifiers.html
- [12] Singlemode fibers. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/single-mode-fibers>
- [13] WEI, Chengli, R. JOSEPH WEIBLEN, Curtis R. MENYUK a Jonathan HU. *Negative curvature fibers*. Advances in Optics and Photonics [online]. 2017, 9(3) [cit. 2022-01-13]. ISSN 1943-8206. Dostupné z: doi:10.1364/AOP.9.000504
- [14] KOMANEC, M., D. SUSLOV, S. ZVANOVEC, et al. *Low-Loss and Low-Back-Reflection Hollow-Core to Standard Fiber Interconnection*. IEEE Photonics Technology Letters [online]. 2019, 31(10), 723-726 [cit. 2022-01-15]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2019.2902635
- [15] SUSLOV, Dmytro, Matěj KOMANEC, Eric R. NUMKAM FOKOUA, et al. *Low loss and high performance interconnection between standard single-mode fiber and antiresonant hollow-core fiber*. Scientific Reports [online]. 2021, 11(1), 723-726 [cit. 2022-01-15]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-021-88065-2
- [16] WANG, Hao, Abdul A. S. AWWAL, Khan M. IFTEKHARUDDIN, et al. *Reduction of multipath interference in a few mode fibers using spatial filters*. Scientific Reports [online]. 2021, 2007-9-13, 11(1), 66950K- [cit. 2022-01-15]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1117/12.732594
- [17] How to model laser beam propagation in OpticStudio: Part 1 - Gaussian beam theory and ray-based approach. *Zemax* [online]. [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005490261-How-to-model-laser-beam-propagation-in-OpticStudio-Part-1-Gaussian-beam-theory-and-ray-based-approach>
- [18] KASAP, S. O., Harry E. RUDA a Yann BOUCHER. *Cambridge illustrated handbook of optoelectronics and photonics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-81596-3.

- [19] Quick guide on laser beam divergence measurement. *Gentec-eo* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.gentec-eo.com/blog/laser-beam-divergence-measurement>
- [20] Beam divergence. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html
- [21] PETROVICH, Marco N., Natalie V. WHEELER, Alexander M. HEIDT, Naveen K. BADDELA, S. REZA SANDOGHCHI, Yong CHEN, Francesco POLETTI a David J. RICHARDSON. *High sensitivity gas detection using Hollow Core Photonic Bandgap Fibres designed for mid-IR operation*. IEEE SENSORS 2014 Proceedings [online]. IEEE, 2014, 891-894 [cit. 2022-01-29]. ISBN 978-1-4799-0162-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICSENS.2014.6985144
- [22] TERREL, Matthew A., Michel J. F. DIGONNET a Shanhui FAN. *Resonant Fiber Optic Gyroscope Using an Air-Core Fiber*. Journal of Lightwave Technology [online]. 30(7), 931-937 [cit. 2022-01-29]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2011.2177959
- [23] DING, Meng, Matej KOMANEC, Dmytro SUSLOV, et al. *Long-Length and Thermally Stable High-Finesse Fabry-Perot Interferometers Made of Hollow Core Optical Fiber*. Journal of Lightwave Technology [online]. 38(8), 2423-2427 [cit. 2022-01-29]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2020.2973576
- [24] POGGIOLINI, Pierluigi a Francesco POLETTI. *Opportunities and Challenges for Long-Distance Transmission in Hollow-Core Fibres*. Journal of Lightwave Technology [online]. 1-1 [cit. 2022-01-30]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2021.3140114
- [25] NESPOLA, Antonino, Stefano STRAULLU, Thomas D BRADLEY, et al. *Transmission of 61 C-band Channels with L-band Interferers over Record 618km of Hollow-Core-Fiber*. Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2020 [online]. Washington, D.C: OSA, 2020, Th4B.5- [cit. 2022-01-30]. ISBN 978-1-943580-75-0. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2020.Th4B.5
- [26] IQBAL, Asif, Paul WRIGHT, Neil PARKIN, Mike FAKE, Marcelo ALONSO, Seyed Reza SANDOGHCHI a Andrew LORD. *First Demonstration of 400ZR DWDM Transmission through Field Deployable Hollow-Core-Fibre Cable*. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021 [online]. Washington, D.C: OSA, 2021, F4C.2- [cit. 2022-01-30]. ISBN 978-1-943580-86-6. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2021.F4C.2
- [27] KONG, Deming, Zhengqi REN, Yongmin JUNG, et al. *100 Gbit/s PAM-16 Transmission in the 2- μ m Band over a 1.15-km Hollow-Core Fiber*. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021 [online]. Washington, D.C: OSA, 2021, Th4E.6- [cit. 2022-01-30]. ISBN 978-1-943580-86-6. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2021.Th4E.6

- [28] SAKR, H., K. R. H. BOTTRILL, N. TAENGNUI, et al. *Interband Short Reach Data Transmission in Ultrawide Bandwidth Hollow Core Fiber*. Journal of Lightwave Technology [online]. 38(1), 159-165 [cit. 2022-01-30]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2019.2943178
- [29] A world first : Data transmission between European satellites using laser light. Esa.int [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/A_world_first_Data_transmission_between_European_satellites_using_laser_light
- [30] Free-space Optical Communications. RP Photonics Encyclopedia [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/free_space_optical_communications.html
- [31] XARCHA, V., A. N. STASSINAKIS, H. E. NISTAZAKIS, G. P. LATSAS, M. P. HANIAS, G. S. TOMBRAS a A. TSIGOPOULOS. *Wavelength diversity/or Free Space Optical Systems: Performance evaluation over log normal turbulence channels* [online]. IEEE, 2012, 2012, 678-683 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-1-4577-1438-2. Dostupné z: doi:10.1109/MIKON.2012.6233628
- [32] Insertion Loss. RP Photonics Encyclopedia [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/insertion_loss.html
- [33] Bit Error Rate. RP Photonics Encyclopedia [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/bit_error_rate.html
- [34] Why do plano-convex lenses reduce spherical aberration?. CLZ Precision Optics [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.clzoptics.com/news/why-do-plano-convex-lenses-reduce-spherical-aberration.html>
- [35] DEBORD, B., A. AMSANPALLY, M. CHAFER, et al. *7.7 dB/km Transmission loss at 750 nm inhibited-coupling guiding hollow-core photonic crystal fibers* [online]. IEEE, 2017, 2017, 1-1 [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-1-5090-6736-7. Dostupné z: doi:10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8087038
- [36] WHEELER, N. V., M. N. PETROVICH, R. SLAVÍK, et al. *Wide-bandwidth, low-loss, 19-cell hollow core photonic band gap fiber and its potential for low latency data transmission*. National Fiber Optic Engineers Conference [online]. Washington, D.C: OSA, 2012, 2012, PDP5A.2- [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-1-55752-935-0. Dostupné z: doi:10.1364/NFOEC.2012.PDP5A.2
- [37] AMEZCUA-CORREA, R., F. GÈRÔME, S. G. LEON-SAVAL, N. G. R. BRODERICK, T. A. BIRKS a J. C. KNIGHT. *Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers*. Optics Express [online]. 2008, 16(2) [cit. 2022-04-25]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.16.001142

- [38] KNIGHT, J. C., T. A. BIRKS, P. St. J. RUSSELL a D. M. ATKIN. *All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding*. Optics Letters [online]. 1996, 21(19) [cit. 2022-05-05]. ISSN 0146-9592. Dostupné z: doi:10.1364/OL.21.001547
- [39] CREGAN, R. F., B. J. MANGAN, J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, P. St. J. RUSSELL, P. J. ROBERTS a D. C. ALLAN. *Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air*. Science. 1999, 285(5433), 1537-1539. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.285.5433.1537
- [40] YABLONOVITCH, Eli. *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*. Physical Review Letters [online]. 1987, 58(20), 2059-2062 [cit. 2022-05-05]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.58.2059
- [41] JOHN, Sajeev. *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*. Physical Review Letters [online]. 1987, 58(23), 2486-2489 [cit. 2022-05-05]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.58.2486
- [42] N. Venkataraman et al., *Low Loss (13 dB/km) Air Core Photonic Band-Gap Fibre*. 2002 28TH European Conference on Optical Communication. 2002, pp. 1-2 [cit. 2022-05-05]. ISBN 87-90974-63-8. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1601381>
- [43] B. J. Mangan et al., *Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber*. Optical Fiber Communication Conference, 2004. OFC 2004, 2004, pp. 3 pp. vol.2- [cit. 2022-05-05]. ISBN 1-55752-772-5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1362294>
- [44] PRYAMIKOV, Andrey D., Alexander S. BIRIUKOV, Alexey F. KOSOLAPOV, Victor G. PLOTNICHENKO, Sergei L. SEMJONOV a Evgeny M. DIANOV. *Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow - core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region > 35 m*. Optics Express [online]. 2011, 19(2) [cit. 2022-05-05]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.19.001441
- [45] JASION, Gregory T, Hesham SAKR, John R HAYES, et al. *174 dB/km Hollow Core Double Nested Antiresonant Nodeless Fiber (DNANF)*. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022 [online]. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022, 2022, Th4C.7- [cit. 2022-05-13]. ISBN 978-1-55752-466-9. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2022.Th4C.7
- [46] Fiber-Optic Cabling. Network Academy.io [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.networkacademy.io/ccna/ethernet/fiber-optic-cabling>
- [47] Calculating Optical Fiber Latency. M2 Optics [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.m2optics.com/blog/bid/70587/calculating-optical-fiber-latency>

- [48] BRADLEY, T.D., G.T. JASION, J.R. HAYES, et al. *Antiresonant Hollow Core Fibre with 0.65 dB/km Attenuation across the C and L Telecommunication Bands*. 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019) [online]. Institution of Engineering and Technology, 2019, 2019, 294 (4 pp.)-294 (4 pp.) [cit. 2022-05-05]. ISBN 978-1-83953-185-9. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2019.1028
- [49] Corning® SMF-28e+® Optical Fiber. Corning [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber/optical-fiber-products/smf-28e-.html>
- [50] SANDERS, Glen A., Austin A. TARANTA, Chellappan NARAYANAN, et al. *Hollow-core resonator fiber optic gyroscope using nodeless anti-resonant fiber*. Optics Letters [online]. 2021, 46(1) [cit. 2022-05-06]. ISSN 0146-9592. Dostupné z: doi:10.1364/OL.410387