

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Optická vazba a měření optických komponent pro aplikaci PoF (Power over Fiber)

Bedřich Kyndl

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kyndl** Jméno: **Bedřich** Osobní číslo: **435015**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optická vazba a měření optických komponent pro aplikaci PoF (Power over Fiber)

Název diplomové práce anglicky:

Optical coupling and measurement of optical components for PoF (Power over Fiber) application

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy optických vláknových vlnovodů. Zaměřte se na technická řešení přenosu optického výkonového signálu pro aplikaci PoF (Power over Fiber).
- 2) Proveďte návrh optické vazby z optického zdroje zakončeného velkopřůměrovým vláknem do optických vláken s menším průměrem.
- 3) Proveďte návrh optické vazby z optického zdroje vyzařujícího z volného prostoru do optického vlákna.
- 4) Změřte vlastnosti dostupných optických komponent pro aplikaci PoF (Power over Fiber).
- 5) Experimentálně ověřte funkčnost navržených optických vazeb.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. D. Kos: Napájecí zdroj Power-Over-Fiber, Diplomové práce VUT Brno 2018.
3. C. Diouf, V. Quintard, L. Ghisa, M. Guegan, A. Perennou, L. Gautier, M. Tardivel, S. Barbot, V. Dutreuil, F. Colas, Design, characterization, and test of a versatile single-mode power-over-fiber and communication system for seafloor observatories. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 45(2), 656-664, 2020, DOI 10.1109/JOE.2018.2876049.
4. P. Wei, C. Zhao, H. Huang, S. Lu, C. Li, H. Deng: Power-over-fiber system with energy management scheme for electric power industry. Optical Engineering 58(9), 096104, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **14.09.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2024**

doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady při konzultacích během vzniku této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Tomášovi Martanovi Ph.D. za pomoc při přípravě taperovaných vlnovodů pomocí technologie Vytran[®] Filament Fusion Splicer.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a pouze s pomocí citovaných zdrojů pod vedením doc. Ing. Václava Prajzlera, Ph.D.

Abstrakt

Cílem práce je navrhnout a prakticky ověřit metody vazby rozdílných typů optických vláken, pro přenos optického záření určeného pro napájení vzdáleného zařízení. Spojovaná vlákna se liší průměry jader, profily indexu lomu a numerickými aperturami.

Jako vstupní vlákno je uvažováno FG105LCA 105/125 μm (jádro/plášť) se skokovou změnou indexu lomu. V práci jsou navrženy a v prostředí BeamPROP-Soft simulované metody vazby využívající kónicky se sužujícího vlákna (taperové přechody) a vazby pomocí vláken s dvojitou plášťovou strukturou (DCF). Také zde byla navržena a simulována vazba pomocí soustavy čoček. Návrhy byly optimalizovány pro vlnovou délku 980 nm.

V rámci měření byly vytvořeny a měřeny vzorky využívající taperových přechodů a DCF vláken. Taperované přechody byly vytvořeny pomocí zařízení VytranTM GPX-3000. Naměřené účinnosti vazby vzorků s taperovými přechody a vzorků s úseky DCF vláken byly porovnány se vzorky přímo navařených vláken a dále pak se vzorky využívající konektorové spoje. Vzorky s nejvyšší naměřenou účinností byly porovnány s komerčně dostupným taperem dodaným firmou MH GoPower. Výstupy simulace čočkové vazby byly porovnány s komerčně dostupným řešením – čočkovým konektorem firmy OZ Optics.

V rámci práce je také měřena účinnost vazby u experimentálního otočného konektoru SPINNER. V závěru praktické části byly měřeny vlastnosti výkonových rozbočnic a jednoduchého systému WDM pro systémy Power over Fiber.

U vzorků využívajících úseky DCF vlákna do 1 metru se neprokázalo zlepšení účinnosti vazby. Dle naměřených hodnot je nejúčinnějším způsobem vazby pro vzorky využívající navazující vlákno se skokovou změnou indexu lomu (např.

vlákno FG050LGA nebo Molex 50/70 μm) čočkový konektor od OZ Optics s útlumem spoje -0,8 až -0,9 dB. Pro situace, kdy je navazované vlákno s gradientním profilem indexu lomu, byl naměřen nejnižší útlum $-4,87 \pm 0,49$ dB při vlnové délce 980 nm u vzorku 16 (FG105LCA/taper(105/125 \rightarrow 50/59)/OM2). Pro situace, kdy je navazováno vlákno s gradientním profilem indexu lomu se jeví použití vláknového přechodu jako výhodnější, neboť čočkový konektor vykazoval při vazbě odpovídajících vláken útlum -14,1 až -15,8 dB. Účinnost vazby u otočného konektoru v měřeném intervalu otáček byla $-0,89 \pm 0,13$ dB oproti referenčnímu vláknu.

Hlavním výsledkem předložené diplomové práce je návrh a ověření účinnosti optické vazby mezi optickým vláknem s průměrem jádra 105 μm do optických vláken s menším průměrem jádra. U jednotlivých vzorků jsou změřeny spektrální charakteristiky a účinnost vazby. Výsledné účinnosti vazby jsou navzájem porovnány a je diskutován druh vazby s nejvyšší účinností.

Klíčová slova: Power over Fiber, účinnost vazby, průměr vidového pole, vláknové taperování, optická vlákna, fotovoltaický výkonový konvertor, přenos energie pomocí optického svazku.

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
Praha, Technická 1902/2,
místnost: E1-102b

Abstract

The purpose of this thesis is to suggest and check different types of optical fibers joints methods used for transmitting highly power optical radiation for power supply of remote devices. Optical fibers are different in cores diameters, profiles of refractive index and numerical apertures.

The fiber FG105LCA 105/125 μm (core/cladding) with step index profile is consider like input fiber in this thesis. There are designed and simulated methods of couplings in BeamPROP-RSoft environment with interfaces which used conical tapering fibers (taper couplers) and with double clad fibers (DCF) and. There was also designed and simulated coupling which uses a system of lenses. The designs were optimized for a wavelength of 980 nm.

There were created and measured samples which use taper couples for measurement purposes and DCF fibers. Tapered couplers were created by VytranTM GPX-3000 device. Measured efficiency of samples using tapers couplers or DCF parts were compared with samples directly coupled fibers and then with samples using connector couplers. Samples with the highest efficiency were compared with commercially available taper supplied by the company MH GoPower. Simulations outputs of the lenses coupling were compared with Oz Optics lens connector.

In this thesis there is also measured the efficiency of experimental SPINNER spin connector. In the conclusion of practice part there were measured optical splitters and simple WDM systems for Power over Fiber system measured.

There weren't observed improvements of coupling efficiency at samples which use parts of DCF fibers. According to measured values, the most effective way of coupling for samples which use step index fibers (for example FG050LGA or Molex

50/70 μm) is using OZ Optics lens connector with coupling insertion lost from -0,8 to -0,9 dB.

In cases with joined fibers with gradient refractive index profile, the lowest measured lost was $-4,81 \pm 0,49$ dB at wavelength 980 nm at the sample 16 (FG105LCA/taper(105/125 \rightarrow 50/59)/OM2). In cases when gradient fibers are joined the taper fiber couple seems to be the best way because of OZ Optics lens connector has coupling attenuation from -14,1 to -15,8 dB. The coupling efficiency by the SPINNER FORJ spin connector in measured round range has attenuation $-0,89 \pm 0,13$ dB in comparison with reference fiber.

The main result of the presented thesis is the design and verification of the efficiency of optical coupling between optical fibers with a core diameter of 105 μm to optical fibers with smaller core diameter. Spectral characteristics and coupling efficiency at the individual samples have been measured. Results coupling efficiencies have been compared and the types of couplings with highest efficiency are being discussed.

Keywords: Power over Fiber, cupling efficiency, Mode Field Diameter, fiber tapering, optical fibers, photovoltaic power conventor, transmission of energy by optical beam.

Title translation: Optical coupling and measurement of optical components for PoF (Power over Fiber) aplication

Obsah

Seznam použitých zkratk	1
Definice použitých symbolů	3
Úvod	5
1 Přenos elektrické energie pomocí optického vlákna	7
1.1 Zdroje optického záření pro systémy PoF	10
Příklady komerčně dostupných řešení JDSU PPM-5 Photonic Power Module	11
MH GoPower POF-VL240	12
RHL Industries, Inc. – Power over Fiber systém	13
1.2 Optické vláknové vlnovody	14
Jev Fiber-Fuse	18
Praha maximálních provozovatelných optických výkonů ve vlákně	20
1.3 Fotovoltaické výkonové převodníky	23
Příklady komerčně dostupných řešení od společnosti MH GoPower	24
2 Návrh vazebních členů vhodných pro systémy PoF	27
2.1 Vazba pomocí optického vlákna	27
2.2 Optická vazba volným prostorem	31
3 Výsledky simulací RSoft	35
3.1 Přímá vazba vláken a vazba s využitím vláknového taperu	36
Vazba pomocí taperového přechodu	37
Vazba s využitím vlákna s dvojitou plášťovou strukturou	42
Vliv NA spojovaných vláken na účinnost vazby	45
3.2 Vazba pomocí čoček	48
4 Použité měřicí metody a měřicí přístroje	51
4.1 Použité přístrojové vybavení	51
Optické zdroje firmy SAFIBRA, s.r.o.	51
Optické zdroje OPTOKON, a.s.	51
Ostatní optické zdroje	52
Měřicí přístroje	52
Detektory a řídicí konzole pro měření optického výkonu	52
Spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C	53
Čtyřkanálový testovací systém pro optická vlákna OFT-4212	54
OPTOKON, a.s.	54
Svářecí stanice SUMITOMO Type 72C	54
Stanice pro výrobu taperů Vytran™ GPX-3000	55
4.2 Metody měření	56
4.3 Realizace návrhů	57
Výroba vzorků s taperovými přechody na zařízení Vytran™	59
5 Naměřené výsledky	63
Ověření charakteristik použitých zdrojů	63
Ověření měřených hodnot detektorů používanými pro měření optického výkonu	64
5.1 Spektrální charakteristiky	66
Spektrum komerčně dostupného taperovaného vzorku MH GoPower	71
Spektrální charakteristika vlákna s dvojitou plášťovou vrstvou (DCF13)	73
Spektrální charakteristika čočkového konektoru OZ Optics	74
5.2 Měření vlastností konektorových spojů	76
5.3 Měření vlastností vzorků s přímým navařením	80
5.4 Měření vláknových součástek pro efektivnější přenos optické energie)	86
Měření vzorků využívajících taperovaných přechodů	94
Měření výkonových ztrát vzorku od společnosti MH GoPower	97
Konektor OZ Optics	98
5.5 Měření vlastností optických součástek pro aplikaci PoF (Power over Fiber)	100
Otočný konektor SPINNER 105 μm	104

6 Závěr	109
Literatura	111
Technické dokumentace	113
A Teoretická část, návrhy a simulace	115
A.1 Nejistoty měření	115
B Měření Vlastnosti optických zdrojů	119
B.1 Měření výkonů optických zdrojů	119
B.2 Spektrální charakteristiky optických zdrojů	120
B.3 Změřené výkony u vzorků propojovaných konektory	126
B.4 Přímé navaření vláken	129
Naměřené výsledky v μW	129
Výsledky udávané v dB	132
B.5 Měření vzorku 2 (FG105LCA/OM2) a 7 (FG105LCAOM1) po úpravě	135
B.6 Přímé navaření vláken	137

Obrázky

- 1.1 Příklady hybridních kabelů v řezu
a) kabel se dvěma měděnými vodiči a dvěma samostatnými vlákny, b) kabel se dvěma měděnými vodiči a vícevlákněným optickým kabelem, c) se dvěma páry měděných vodičů a dvěma vícevlákněným optickými kabely. Obrázek byl inspirován nabídkou společností Belden, Inc. a OPTOKON a.s. [a], [b]. 8
- 1.2 Blokové schéma a) Systému využívajícího jediné vlákno b) systému využívajícího více vláken. 9
- 1.3 Fotografie zařízení PPM5 od výrobce JDSU, využívající sdílené vlákno pro data i záření určené k napájení [c]. 12
- 1.4 Fotografie zařízení MH GoPower POF-VL240 - zařízení pro inteligentní vzdálený monitorovací systém. Zařízení využívá oddělených kanálů-vláken pro data a výkonové záření pro napájení zařízení [d]. 13
- 1.5 Fotografie zařízení RHL Industries Power over Fiber, a) místní jednotka se dvěma 830 nm lasery, b) vzdálené zařízení se dvěma vstupy a dvěma zabudovanými PPC články [e]. 14
- 1.6 Příčné řezy vláken a) jednojádrové vlákno SMF o průměru 9/125 μm (jádro plášť), b) vlákno OM2 o průměru 50/125 μm (jádro plášť), c) vlákno OM1 o průměru 62,5/125 μm (jádro plášť) d) vlákno FG105LCA o průměru 105/125 μm (jádro plášť) e) vlákno s dvojitou plášťovou strukturou DCF, f) výcejádrové vlákno MCF s kruhovým uspořádáním jader g) vlákno využívající vzduchová jádra (HCF vlákno). 16
- 1.7 Snímky čel vybraných vláken používaných v rámci této práce. Snímky byly pořízeny pomocí vláknového mikroskopu EXFO-FIP 400B. 16
- 1.8 Příklady uvažovaných napojení optických vláken. Velikostní poměry jsou zachovány. Vpravo je vždy vstupní vlákno FG105LCA, na které je přivařeno a) vlákno FG105LCA (105/125 μm), b) vlákno OM1 (62,5/125 μm), c) vlákno OM2 (50/125 μm), d) SMF-28 (9/125 μm), e) SMF (4/125 μm). 18
- 1.9 Čelo vlákna FG105LCA poškozeného vysokým optickým výkonem při nedbale očištěném konektoru. Snímek byl pořízen pomocí vláknového mikroskopu EXFO-FIP 400B. 19
- 1.10 Výkonové prahy pro v této práci uvažované průměry vláken. Křížky jsou vyznačeny průměry jader vláken, použitých v této práci. Graf nezohledňuje rozdílné koncentrace dopantů a rozdílné profily indexů lomu vláken uvažovaných v této práci. 22
- 1.11 Fotografie PPC článků MIH[®] řady YCH od společnosti MH GoPower. Obrázky byly převzaty z dokumentací ze stránek výrobce [f]. 25
- 2.1 Propojovací přechody tvořené tapery (kónicky se sužující vlákna v směru šíření záření) předdefinované v prostředí BeamPROP a) s lineárním, b) exponenciálním, c) kvadratickým tvarem hrdla taperu. Tvary taperu navržené v rámci práce d) s kvadratickým průběhem, e) kosinovým průběhem f) logaritmickým průběhem. 29

2.2 Taper složený ze tří dílčích úseků a) $3 \times$ kvadratický úsek, b) $3 \times$ kosinový úsek, c) kosinový-mnou definovaný kvadratický-kosinový úsek, d) můj def. kvadratický-kosinový-můj def. kvadratický, e) můj def. kvadratický-logaritmický-můj def. kvadratický f) můj def. kvadratický-předef. kvadratický-můj def. kvadratický. 30	3.4 Účinnost vazeb při použití tří-úsekových taperovaných vláknových přechodů v závislosti na jejich délce a tvaru a) $3 \times$ kosinus a $3 \times$ kvadratický úsek, b) kombinace kosinových a kvadratických úseků, c) logaritmický resp. předdefinovaný kvadratický úsek taperu vložený mezi dva navržené kvadratické. V simulacích bylo uvažováno navazující vlákno FG050LGA 50/125 μm se skokovou změnou indexu lomu. ... 39
2.3 Schematický náčrt sestavy čoček pro zlepšení vazby výkonového optického záření mezi vlákny s průměrem jádra 105 μm a 50 μm . 31	3.5 Přenesený výkon v závislosti na délce použitého lineárního taperového přechodu a vlákna s odpovídajícím průměrem jádra. 42
2.4 Návrh sestavy s konkrétními prvky od společnosti Thorlab požadovanými pro realizaci fokusační klece. 33	3.6 Vazba vláken modelovaná v prostředí BeamPROP. s navazujícím vláknem a) SMF 9/125 μm , b) FG050LGA 50/125 μm , c) vláknem 62,5/125 μm . Jádro DCF vlákna je vyznačeno šedou barvou. . 43
3.1 Změna indexu lomu čistého křemenného skla SiO_2 . S vyznačenými indexy na vlnových délkách, které jsou nejčastěji v technologiích PoF využívány. Data pro vykreslení byla získána z webu refractiveindex.info. 36	3.7 Výkon na výstupním vlákně FG050LGA v závislosti na délce použitého DCF vlákna. Simulovaná délka DCF vlákna je 0-200 mm. ... 43
3.2 Závislost průměru jádra navazujícího optického vlákna a jeho NA na přenesené energii. 37	3.8 Měření výkonové úrovně ve vzorcích vyžívající DCF vláknem s napojeným a) SMF 9/125 μm , b) FG050LGA 50/125 μm , c) vláknem 62,5/125 μm 44
3.3 Účinnost vazeb při použití taperovaných vláknových přechodů v závislosti na jejich délce a tvaru a) předdefinovaných v prostředí RSoft-BeamPROP, b) navržených v rámci práce. V simulacích bylo uvažováno navazující vlákno FG050LGA 50/125 μm se skokovou změnou indexu lomu. 38	3.9 Přenesený výkon pro a) vlákno SMF-28 s průměrem jádra 8,2 μm b) s FG050LGA s průměrem jádra 50 μm s reálnými NA a NA splňující podmínku dle vztahu 3.3. 47
	3.10 Přenesený výkon pro a) vlákno OM1 s průměrem jádra 62,5 μm b) Vlákno FG105LCA s průměrem jádra 105 μm s reálnými NA a NA splňující podmínku dle vztahu 3.3. 48
	3.11 Model soustavy čoček pro vazbu výkonového optického záření v prostředí BeamPROP. 49

3.12 Výkon optického záření šířeného navrženou soustavou čoček, a) s Gaussovským svazkem b) vícevidovým svazkem.	50	5.1 Použitá rozbočnice s označením použitého výstupu. Na obrázku vlevo jsou 4 výstupy samostatně vpravo je vstup.	64
4.1 Celkový pohled na svářecí stanici SUMITOMO Type 72C.	55	5.2 Spektrální charakteristiky referenčního vlákna FG105LCA 105/125 μm (jádro/plášť).	67
4.2 Detailní fotografie a) svářecího prostoru, b) pece pro zatavení ochranné bužírky.	55	5.3 Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení u vzorku S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1).	67
4.3 Schématický náskres postupu při měření útlumu metodou vložných ztrát a) Měření s úsekem referenčního vlákna (zjišťování hodnoty P_1), b) Měření s úsekem měřeného vlákna (zjišťování hodnoty P_2).	57	5.4 Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení u vzorku S1 (FG105LCA/OM1/OM2), u vzorku S2 (FG105LCA/OM2) a u vzorku S8 (FG105LCA/OM2).	68
4.4 Fotografie požitých nástrojů pro přípravu vlákna a) kleště pro odstranění ochranné bužírky, b) lamačka vlákna.	58	5.5 Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení vláken u vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm), u vzorku S4 (FG105LCA/SMF 4 μm) a u vzorku S5 (FG105LCA/SMF 9 μm).	68
4.5 Fotografie z kamery mikroskopu s pasy taperů o požadovaném průměru a) vlákno FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť) taperované na průměr 62,5/74,5 μm (jádro/plášť), b) vlákno OM1 s průměrem 62,5/125 μm (jádro/plášť) taperované na průměr 50/100 μm (jádro/plášť). Číslo na snímku vpravo značí průměr pláště v měřeném místě. Druhé číslo udává vzdálenost od předchozího měřeného bodu při hledání pasu taperu. Fotografie byla pořízená při výrobě TAPERU ing. T. Martanem Ph.D.	60	5.6 Spektrální charakteristika vzorků S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) využívajících taperovaných přechodů.	71
4.6 Navaření vlákna standardu OM2 na špičku taperu s průměrem 62,5/74,5 jádro/plášť. a) Špička taperu (125/105 - 59/50 μm) na OM2 (125/50 μm) před svárem (osa y), b) Svar taperu (125/105 - 59/50 μm) na OM2 (osa y). Fotografie byla pořízená při výrobě TAPERU ing. T. Martanem Ph.D.	61	5.7 Spektrální charakteristika vzorku MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B.	72
		5.8 Porovnání spekter vzorků využívajících vláknových taperů vyrobených pomocí zařízení Vytran TM a adaptéru stopy pole MFA MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B.	73
		5.9 Spektrální charakteristika vlákna s dvojitým pláštěm DCF13-Thorlabs v porovnání s referenčním vláknem FG105LCA.	74
		5.10 Fotografie hybridního čočkového konektoru OZ Optics a) boční pohled, b) pohled shora.	75
		5.11 Spektrální charakteristika čočkového konektoru OZ Optics. ...	75

5.12 Účinnost vazby u měřených vzorků využívajících konektorových spojek, a) zakončenými vláknem SMF 4 μm , b) srovnání účinností vzorků s odlišnými průměry výstupních vláken.	79	5.21 Schéma zapojení jednoduchého systému WDM slučujícího optické záření z laseru zářícího na vlnové délce 808 nm a širokospektrální SLED pracující na centrální vlnové délce 1298 nm	103
5.13 Účinnost vazby u vzorků využívajících DCF vlákno v porovnání se vzorky, které DCF vlákno nevyužívají, a) aritmetický průměr, b) medián. V grafu je uvedeno vstupní a výstupní vlákno.	80	5.22 Spektrální charakteristika jednoduchého systému WDM připojeného na optické zdroje 808 nm a 1298 nm.....	103
5.14 Maximální výstupní výkony laserů SAFIBRA. s.r.o, pracujících na vlnové délce 650, 808 a 850 nm....	84	5.23 Detail měřeného otočného konektoru SPINNER (přípravek pro testování otočného konektoru byl vyroben v rámci disertační práce ing. Petra Martinka).	104
5.15 Maximální výstupní výkony laserů SAFIBRA. s.r.o, pracujících na vlnové délce 976 a 1550 nm.....	84	5.24 Fotografie zařízení s otočným konektorem SPINNER (přípravek pro testování otočného konektoru byl vyroben v rámci disertační práce ing. Petra Martinka).	105
5.16 Výstupní výkony SLED SAFIBRA $\lambda = 1298, 1474$ a 1565 nm.....	85	5.25 Naměřená úroveň výkonu při různých otáčkách otočného konektoru.	107
5.17 Výstupní výkony při použití laserů v zařízeních OPTOKON, a.s., a) pro vlnové délky 1490 a 1550 nm (zařízení OFT-840), b) 1310 nm (zařízení OFT-840).	85	A.1 Výsledek počítačové simulace pro předpokládaný průměr jádra optického vlákna o rozměrech a) 30 μm b) 70 μm s reálnými NA a dále pak NA splňující podmínku dle vztahu 3.3.	117
5.18 Útlum jednotlivých vzorků při vlnových délkách a) 850 nm, b) 980 nm, c) 1300 nm v závislosti na čase.	92	A.2 Počítačová simulace taperovaného vlákna FG105LCA s navazujícím vláknem FG050LGA při a) $NA_{in} = NA_{out}$, b) $NA_{in} = 2 \cdot NA_{in}$ při průměru jádra navazujícího vlákna 50 μm dle podmínky 3.3. Simulovaná vlnová délka je 980 nm.	118
5.19 Naměřená výkonová úroveň pro vzorky S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) pro vlnovou délku a) 850 nm, b) 980 nm, c) 1300 nm. . .	95		
5.20 Schéma optické rozbočnice 1 \times 2Y s označeným vstupem a dvěma výstupy A, B. Výstupy rozbočnice jsou tvořeny vlákny s průměrem jádra 105 μm s $NA = 0,22$ a skokovým profilem indexu lomu. .	100		

B.1 Spektrální charakteristiky zdroje SLS201L/M a SLED SAFIBRA OFLS-B-31-10-100-C. Na výstup zdrojů záření bylo připojeno vlákno FG105LCA, které bylo přes konektorovou spojku FC/PC propojeno s vláknem OM2. Vlákno OM2 bylo připojeno do optického vstupu spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C.	121	B.10 Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření vzorek 12 využívající taperovaných přechodů.	137
B.2 Spektrální charakteristiky optických zdrojů SLED od firmy SAFIBRA, s.r.o. a širokospektrální zdroj SLS201L/M.	122	B.11 Spektrální charakteristiky spojení vláken OM1/OM2 o délce 1 m. . .	137
B.3 Spektrální charakteristika laseru OFLS-6-808-250 s vlnovou délkou 808 nm a OFLS-L-850-10 vyzařujícího na vlnové délce 850 nm.	122	B.12 Spektrální charakteristiky spojení vláken OM2/SMF 9 μm o délce 1 m.....	138
B.4 Spektrální charakteristiky a) laseru OFLS-6K PLM vyzařujícího na vlnové délce 976 nm b) laseru OFLS-L-1550-2 vyzařujícího na 1550 nm.	123		
B.5 Spektrální charakteristika laseru OFLS-L-658-3 PLM vyzařujícího na vlnové délce 650 nm.	124		
B.6 Spektrální charakteristika laseru použitým v zařízení OFT-840 vyzařujícím na vlnové délce 1310 nm.	124		
B.7 Spektrální charakteristika laseru LS-800 vyzařujícího na vlnových délkách 1490 a 1550 nm.	125		
B.8 Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření pro opětovně navařený vzorek 7 (FG105LCA/OM1).	136		
B.9 Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření pro opětovně navařený vzorek 2 (FG105LCA/OM1).	136		

Tabulky

1.1 Prahové hodnoty výkonových hustot pro zapálení Fiber-Fuse pro MFD při vlnové délce 1550 nm. Hodnoty byly převzaty z [13]. Tabulka uvádí příklad konvenčního vlákna SMF-28 (jádro/plášť – 8,2/125 μm), disperzně posunutého vlákna DSF a disperzně posunutého vlákna s nenulovou disperzí NZDSF.	21
1.2 Odhadované konstanty c_{PSL} a c_{TDT} optické výkonové hustoty na rozhraní vzduch/sklo při rozdílných provezech laseru pro běžná křemenná vlákna. Hodnoty byly převzaty ze stránek prodejce Thorlabs [14].	21
1.3 Vypočtené hodnoty PSL a TDT pomocí vztahů 1.3 a 1.4. Výsledek je uveden pro vybrané SiO_2 vlákna použitá v této práci. Pro porovnání s experimentálně ověřenými hodnotami z [13] uvádím také výpočet pro NZDSF (NZDSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) a DSF (DSF – Dispersion Shifted Fiber). Uvažované hodnoty platí pro lasery s kontinuálním provozem.	21
1.4 Tabulka vybraných parametrů PPC vertical multi-junction článků Si MIH [®] MH GoPower řady YCH. Parametry byly přebrány z technických dokumentací jednotlivých modelů ze stránek výrobce [f]. Vybírány byly nejvyšší vstupní výkony, pro které výrobce u daného modelu uvádí výstupní parametry.	25
2.1 Uvažovaná navazovaná vlákna a parametry určené pomocí vzorců 2.2,2.4.	32
2.2 Parametry čoček klíčových pro jejich výběr při konstrukci vazebního systému.	32
3.1 Průměrná účinnost přenosu pro tapery délek 3,25 mm - 15 mm, nárůst účinnosti oproti přímému spojení vlákna FG105LCA a FG050LGA se skokovou změnou indexu lomu a rozptyl hodnot	40
3.2 Rozdíl účinností vazby při navazování vlákna s gradientním a skokovým profilem indexu lomu.	45
3.3 Účinnost vazby u vláken s přímým napojením pomocí svaru. V tabulce jsou uvažována vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Dále jsou uvedeny hodnoty, pro reálné NA spojovaných vláken a pro ideální NA navazujících vláken. Ideální NA (NA splňující podmínku dle vztahu 3.3) navazujících vláken má umožňovat zvýšení účinnosti vazby.	46
3.4 Průměrná účinnost vazby u vláken s využívajících na spojích taperových přechodů v délkách 1-1,5 cm. V tabulce jsou uvažována vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Dále jsou uvedeny hodnoty, pro reálné NA spojovaných vláken a pro ideální NA navazujících vláken. Ideální NA (NA splňující podmínku dle vztahu 3.3) navazujících vláken má umožňovat zvýšení účinnosti vazby.	46
4.1 Vybrané parametry použitých měřících detektorů Thorlabs.	53
4.2 Parametry použitého spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C	54
5.1 Tabulka naměřených hodnot optických zdrojů. FWHM udává šířku vyzařované spektrální čáry.	64
5.2 Výkony naměřené na detektorech připojených na měřící konzoly PM200-Thorlabs.	65

5.3 Výkony naměřené na detektorech připojených na měřicí konzoly PM100D-Thorlabs.....	65	5.8 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm), OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm) a OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm). (V případě dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9 až S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště. Lomítko značí svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra před šipkou na průměr jádra za šipkou).	82
5.4 Přehled vzorků. (Lomítko v popisech znamená nerozebíratelné spojení pomocí svaru. U DCF vlákna je v závorce uveden průměr 1. pláště, před závorkou průměr jádra - vzorky S9, S10 a S11.)	66	5.9 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů síťových diagnostických zařízení OPTOKON, a.s. (V případě dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9, S10 ,S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště vlákna. Lomítko značí nerozebíratelný svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).	83
5.5 Přehled vzorků s konektorovými spoji. (Znaménko „+“ v popisech značí konektorový spoj.)	77	5.10 Porovnání účinnosti vazby pro nasimulovaná a změřená data u svařovaných vzorků při vlnové délce 980 nm.(Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).	86
5.6 Výstupní výkon vzorků propojených pomocí konektorových spojek FC/PC při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm), OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm), OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj.)	77		
5.7 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. pracujících na vlnové délce 650, 808, 850, 976 a 1550. (V případě vlákna dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9 až S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště. Lomítko značí svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra před šipkou na průměr jádra za šipkou).....	82		

5.11 Výstupní výkony vzorků tvořených kombinací vláken propojovaných pomocí konektorů FC/PC. Jako zdroj optického záření byl použit laser SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm). Vláknem FG105LCA je používáno jako referenční a jeho délka je deset metrů. (Znak „+“ značí konektorový spoj FC/PC. Vzorek S9 svar vláken FG105LCA/DCF13/OM2 a vzorek S11 je svar vláken FG105LCA/DCF13/OM1).	89	5.18 Vložné ztráty vzorků spojovaných pomocí čočkového konektoru OZ Optics. Zdrojem záření byl laser SAFIBRA s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm). (Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0, P_1, P_2 jsou výkonové režimy laseru SAFIBRA, s.r.o. popsané v kapitole 4.1. Čočkový konektor je v tabulce značen (č. k.)).	99
5.12 Vypočtený měrný útlum α u vláken OM1 a OM2 při vlnové délce 980 nm.	90	5.19 Výstupní výkon jednotlivých výstupů rozbočnice při různých připojeních laserového zdroje.	101
5.13 Naměřené hodnoty a jejich kombinované standardní nejistoty u_c získané měřením na zařízení OPTOKON, a.s. OFT-4212. (Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).	90	5.20 Parametry vstupních kanálů W_r (White reflection) a W_p (White pass) udávané v dokumentaci měřeného WDM.	102
5.14 Porovnání útlumů vzorků S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) před opětovným svařením a po opětovném svaření.	93	5.21 Naměřené výkony laserových zařízení SAFIBRA, s.r.o. Výstupní výkon laseru je volen třemi režimy – P_0, P_1, P_2	102
5.15 Naměřené úrovně výkonu na měřící části zařízení OPTOKON, a.s. OFT-4212. Zkoumány jsou vzorky využívajících taperových přechodů a kombinaci vláken FG105LCA/OM1/OM2.	96	A.1 Seznam potřebných součástí a jejich potřebné množství pro konstrukci sestavy pro vazbu volným prostorem.	116
5.16 Tabulka porovnávací způsoby vazby signálu z výchozího vlákna FG105LCA do vlákna standardu OM1 a OM2.	96	A.2 Vstupní parametry nastavené v simulačním prostředí RSoft-BeamPROP.	116
5.17 Naměřené výkony a jejich kombinované nejistoty získané pomocí testovacího zařízení OPTOKON, a.s. OFT4212.	97	B.1 Závislost výstupního výkonu Nd:YVO ₄ laseru na budícím proudu LD ve zdroji CASIX LDC-1500, λ 532 nm. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.	120
		B.2 Naměřené výkony laserů SAFIBRA, s.r.o. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.	120
		B.3 Naměřené výkony SLED SAFIBRA, s.r.o. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.	120

B.4 Naměřené výkony laserů vybraných zařízení OPTOKON, a.s. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC. 120	
B.5 Výstupní výkon vzorků propojených konektory FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-L-808-250 ($\lambda = 808$ nm) a OFSL-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o.)..... 126	
B.6 Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFSL-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o. 127	
	B.7 Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-L-808-250 ($\lambda = 808$ nm) a OFSL-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm). V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o. 128
	B.8 Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC+PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFSL-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o., hodnoty s příliš nízkým výstupním výkonem, který nebylo možné změřit jsou označeny „X“ 129
	B.9 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-L-658-3 ($\lambda = 650$ nm) a OFSL-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm). 130
	B.10 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm) a OFSL-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm). . 130
	B.11 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFSL-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). 131

B.12 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm) a OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm).	131
B.13 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm).	132
B.14 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů síťových diagnostických zařízení OPTOKON, a.s.	132
B.15 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-658-3 ($\lambda = 650$ nm) a OFLS-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm).	133
B.16 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm) a OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm).	133
B.17 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm).	134
B.18 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm) a OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm).	134
B.19 Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm).	135

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický název	Český název
DBR laser	Distributed Bragg Reflector laser	laser s Braggovským reflektorem
DCF	Double-Clad Fiber	Dvouplášťové optické vlákno
DFB laser	Distributed Feed Back laser	laser s distribuovanou zpětnou vazbou
DSF	Dispersion Shifted Fiber	Disperzně posunuté vlákno
FWHM	Full Width Half Maximum	Šířka vyzařované spektrální čáry
HCF	Hollow Core Fibers	Vlákna s dutým jádrem
HPLD	Hight Power Laser Diode	Vysokovýkonová laserová dioda
MCF	Multi Core Fiber	Vícejádrové vlákno
MFD	Mode Field Diameter	Stopa pole, Průměr vidového pole
MFR	Mode Field Radius	Poloměr vidového pole
MMF	Multi-Mode Fiber	Vícevidové vlákno
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapour Deposition	Metalorganická epitaxe z plynné fáze
NA	Numerical Aperture	Numerická Apertura
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber	Disperzně posunuté vlákno s nenulovou disperzí
PDL	Polarisation Dependent Loss	Polarizační ztráty
PoF	Power over Fiber	Napájení po optickém vlákně
POF	Plastic Optic Fiber	Plastové optické vlákno
PON	Passive Optical Network	Pasivní optická síť
PPC	Photovoltaic Power Conventor	Fotovoltaický výkonový konventor
PSL	Practical Save Level	Praktická bezpečná úroveň výkonu
Ref.	Reference fiber	Referenční vlákno
RL	Return Loss	Útlum odrazu
SDM	Space Division Multiplexing	Prostorový multiplex
SEE	System Energy Efficiency	Energetická efektivnost systému
TDT	Teoretical Damage Treshold	Teoretický práh poškození
TMC	Tapered MCF connestor	Taperovaný MCF konektor
VCSEL	Vertical Clavity Surface Emitting Laser	Laserová dioda vyzařující vertikálně z plochy
WDM	Wavelength Division Multiplex	Vlnový multiplex

■ Definice použitých symbolů

Proměnná	Jednotka	Význam
α	$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	Měrný útlum
$\Delta\lambda$	m	Rozdíl vln. délek – šířka spektrální čáry
λ	m	Vlnová délka
I_{max}	A	Maximální výstupní proud PPC článku
I_e	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Intenzita záření
P_{in}	W	Vstupní výkon
P_{max}	W	Výkonové maximum
P_{out}	W	Výstupní výkon
$P_{out-max}$	W	Maximální výstupní výkon PPC článku
U_{max}	V	Maximální výstupní napětí PPC článku



Úvod

Pro účely napájení vzdálených zařízení komunikujících po optických vláknech se v současnosti u stávajících systémů nejčastěji využívají tzv. hybridní optické kabely. Jedná se o konstrukci, kdy v daném kabelu jsou vedeny měděné vodiče určené pro napájení vzdálené jednotky. Pro přenos dat pak slouží optická vlákna, která jsou vedena souběžně s měděnými vodiči v rámci jednoho kabelu. Tyto vodiče přenáší napětí 12 V nebo 24 V pro napájení vzdáleného zařízení. Existuje mnoho různých variant hybridních kabelů, které se liší počtem párů napájecích vodičů jejich průřezem, ale také typem optického vlákna či vláken. V hybridním optickém kabelu může být použito téměř jakékoliv optické vlákno nejlépe vyhovujícím požadavkům konkrétního systému. Ačkoliv myšlenka přenosu energie pro napájení nízkoenergetických zařízení čistě optickými vlákny je známa již přibližně od sedmdesátých let minulého století, teprve v současné době se tento koncept začíná významně rozvíjet. Nové technologie umožňují výrobu dostatečně kvalitních komponent. Díky integraci pak mohou také vznikat složité kompaktní systémy PoF (Power over Fiber) [1]. Systémy PoF se skládají na vstupu z výkonového laseru, sloužícího jako zdroj energie pro napájení vzdáleného zařízení, optického vlákna jako přenosového média a fotovoltaického konvertoru, který převádí optickou energii zpět na elektrickou.

Při výstavbě optických datových linek určených pro použití v nebezpečných a drsných podmínkách je dokonce požadováno, aby optické kabely neobsahovaly elektricky vodivé části, které např. výše zmíněné hybridní kabely ze své podstaty obsahují. Technologie PoF tedy do budoucna postupně nahradí stávající systémy používající hybridní kabely. Vodiče vedené hybridními kabely mohou způsobit problémy, které nasazení PoF zcela eliminuje nebo alespoň redukuje. Důležitým parametrem této technologie je míra efektivity přenosu. Ta je silně závislá na konkrétní použité sestavě, její parametrech a kvalitě jednotlivých komponent. Obecně lze říct, že přenos energie pomocí PoF vykazuje vyšší ztráty oproti běžným způsobům napájení nebo napájením pomocí hybridních kabelů. Tato technologie však přináší také mnoho předností a jedinečných vlastností oproti napájení pomocí metalických měděných vodičů. Jednou z největších výhod patří pak její bezpečnost při použití v nebezpečných a agresivních prostředích a také vysoká spolehlivost systému. Nasazení PoF je tedy pro mnoho moderních aplikací zajímavým řešením. PoF

mimo jiné umožňuje zjednodušení instalací, kdy ke vzdálenému zařízení je nutné použít v nejjednodušších případech pouze jediné optické vlákno [2]. To přináší výhody také v oblastech, kdy je požadováno, aby byl výsledný komunikační a napájecí svazek co nejmenší (různé sondy určené lékařská vyšetření a zákroky) a dále pak v oblastech, kde chybí napájecí infrastruktura (např. odlehlé horské oblasti). Optická vlákna mají také v porovnání s odpovídajícími metalickými vedeními nižší hmotnost, čehož lze využít v budoucnu např. V dopravě (automobilová, letecká, veřejná), kosmonautice, či vojenství.

PoF lze také aplikovat do nízkovýkonových a středovýkonových anténních systémů [1]. Řešení umožňuje zjednodušení instalace a možností napájení v oblastech bez stávající napájecí infrastruktury. Výhodou také je, že v případě déle trvajícího výpadku napájecí sítě (např. z důvodu přírodní katastrofy) je možné vysílače udržet alespoň v minimálním provozu a umožnit tak přivolání pomoci [2]. PoF také zlepšuje ochranu zařízení před úderem blesku, neboť vysílač a přijímač jsou propojeny optickými vlákny, které jsou vyrobeny z materiálu (sklo, plast) chovajících se jako izolant. V neposlední řadě je možné také koncové zařízení napájet právě takovým množstvím výkonu, které odpovídá jeho momentálnímu zatížení (telekomunikační vysílače), nebo kolik v daný okamžik skutečně potřebují což vede k dalším úsporám energie [2].

Čistě vláknové propojení také podstatně snižuje indukování parazitních vlivů okolního prostředí. Ryze optický kabel může být také veden nebezpečným prostředím nebo vodou, aniž by hrozil úraz elektrickým proudem nebo riziko exploze z důvodu jiskření.

V diplomové práci v kapitole 1 jsou popsány systémy PoF a jejich základními parametry, které podstatně ovlivňují vlastnosti výsledného systému. Jsou zde také stručně zmíněny příklady současného a budoucího využití PoF. Kapitola 2 se zabývá návrhem a metodami vazby výkonového záření do optického vlákna s pomocí vláknových taperů (úseku optických vláken, která se konicky zužují ve směru šíření optického záření) a vazební čočkové klece. Kapitola 3 pak tyto návrhy teoreticky ověřuje pomocí simulačního prostředí BeamPROP. Kapitola 4.3 se zabývá vlastní realizací a vlastním měřením. V kapitole 4 jsou blíže popsány metody měření, které byly v rámci praktické části diplomové práce využity. V této kapitole jsou také popsány klíčové parametry využívaných měřících přístrojů a zařízení. V kapitole 5 jsou pak prezentovány a komentovány získané výsledky.

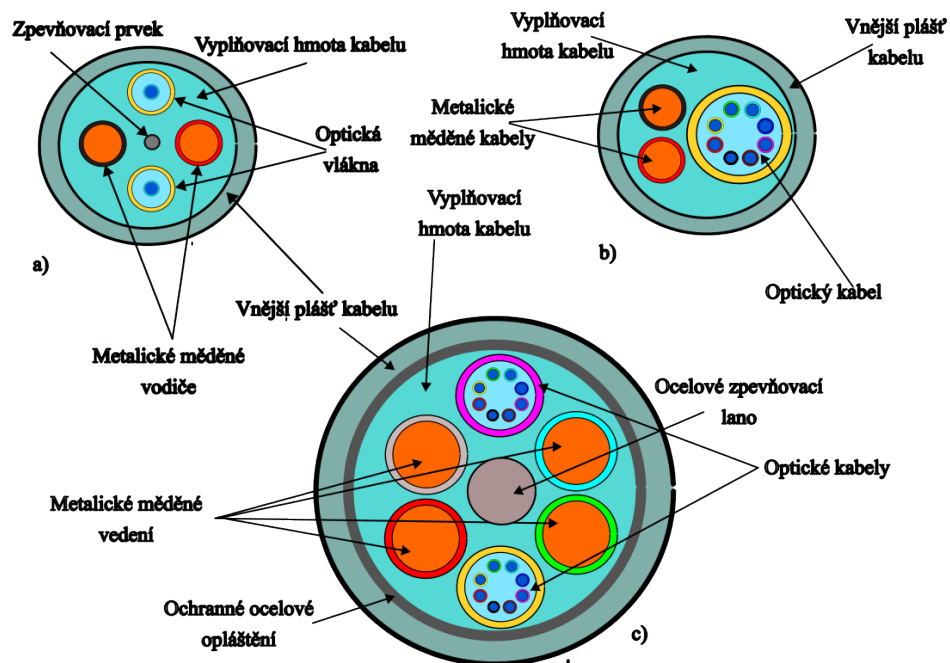
Kapitola 1

Přenos elektrické energie pomocí optického vlákna

Technologie Power over Fiber - PoF (V některé literatuře také značeno jako PWO F - PoWer over Fiber) je technologií umožňující přenos energie po optickém vlákně. Touto energií jsou posléze napájena elektrická zařízení. Obvykle se jedná o zařízení s malou spotřebou. Tato skutečnost je především dána tím, že optický přenos energie v současné době vykazuje nižší účinnost oproti přenosu energie po metalických vedeních. Některé stávající systémy jsou napájeny pomocí tzv. hybridních kabelů.

Hybridní kabely jsou takové kabely, kde v kabelovém svazku jsou kromě optických vláken určených pro přenos signálu instalovány také měděné vodiče, určené výhradně pro napájení. Napájecí napětí na těchto vodičích bývá obvykle 12 V nebo 24 V. Druhů hybridních kabelů je poměrně veliké množství a liší se jak počtem měděných vodičů, tak druhem použitého optického vlákna a materiálem. Obrázek 1.1 představuje příklad třech hybridních kabelů. Obrázek byl inspirován obrázky produktů nabízených společnostmi Belden, Inc. a OPTOKON a.s, [a], [b].

Běžně se v hybridních kabelech využívají, jak jednovidová, tak vícevidová vlákna a to jak skleněná, tak vlákna POF (Plastic Optic Fiber). Na trhu jsou dostupné také hybridní kabely s různými materiály a ochranami, které uzpůsobují vlastnosti kabelů pro použití v daném prostředí. Použití hybridních kabelů má však své principiální nedostatky. Vodiče uvnitř hybridních kabelů totiž stále mohou představovat zdroj indukovaného rušení například při použití v místech se silnými elektromagnetickými poli (rozvodny, transformátorové stanice apod.). Pro tyto aplikace muselo být tedy použito dodatečné stínění, které ale zvyšovalo hmotnost a cenu. Kvůli použitému vodiči také není koncové zařízení galvanicky odděleno a při atmosferickém výboji výboji nebo poruše kabelu může dojít k poškození jak vzdáleného tak místního zařízení. Navíc použití metalických vedení představovalo potencionální zdroj jiskření, který je v mnoha aplikacích nepřijatelný. V případě poškození vlákna je také možné (a ve většině případů i nezbytné) ihned odpojit výkonové optické záření, aby nedocházelo k případnému zranění. Kvůli zmíněným aspektům v nedávné době vznikl požadavek, aby nově konstruované systémy, obzvláště ty jejichž využití se předpokládá v prostorech s nebezpečným prostředím, byly konstruovány bez použití vodivých materiálů a kovových vodičů uvnitř kabelu.



Obrázek 1.1: Příklady hybridních kabelů v řezu a) kabel se dvěma měděnými vodiči a dvěma samostatnými vlákny, b) kabel se dvěma měděnými vodiči a vícevlákněným optickým kabelem, c) se dvěma páry měděných vodičů a dvěma vícevlákněnými optickými kabely. Obrázek byl inspirován nabídkou společností Belden, Inc. a OPTOKON a.s. [a], [b].

Nové požadavky pro konstrukce systémů byly také důvodem aby se začala více rozvíjet technologie PoF a to i přes skutečnost, že v současné době efektivita přenosu energie pro napájení vzdáleného zařízení nedosahuje takové efektivitu, jako je tomu v případě klasického napájení metalickými vodiči. Díky pokroku ve vývoji klíčových optických komponent se efektivita přenosu energie v systémech PoF postupně zvyšuje.

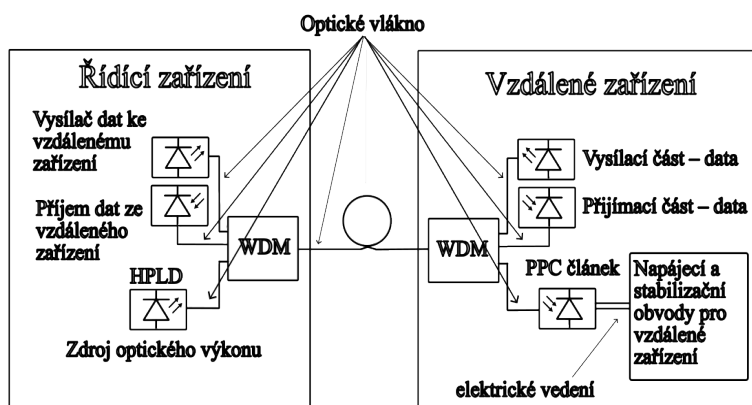
Jak vyplývá z předchozího odstavce významným parametrem systému PoF je energetická efektivita celého systému (SEE - System Energy Efficiency). Hodnotu SEE lze vyjádřit jako poměr výstupního výkonu z PPC (PPC – Photovoltaic Power Converter) článku (P_{out}) vůči vstupnímu výkonu napájecím zdroj optického záření jehož záření je určeno pro zásobování vzdáleného zařízení energií (P_{in}) [3]. Definice pro výpočet efektivitu „SEE“ je dán vztahem 1.1.

$$SEE = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.1)$$

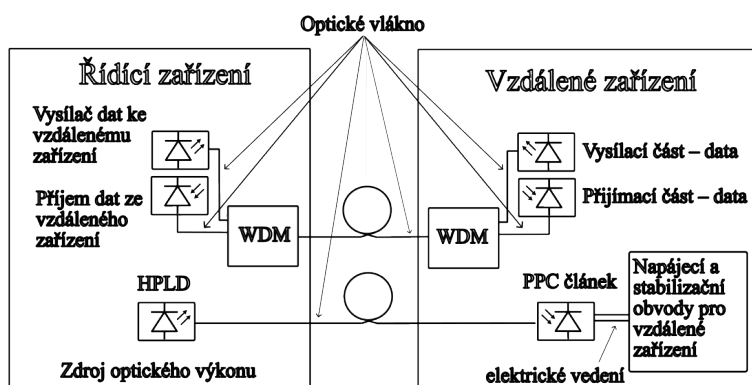
Maximální výkon dodávaný PPC článkem lze zjistit změřením jeho VA-charakteristiky. Pro každý naměřený bod se změřené napětí vynásobí odpovídajícím proudem. U získané křivky nalezneme lokální maximum, jehož hodnota zároveň odpovídá maximálnímu výkonu, který je PPC článek za daného příchozího optického výkonu schopen poskytnout. Maximální dodávaný

výkon se obvykle nachází v koleni VA-charakteristiky. Pracovní bod PPC článku je proto vhodné nastavit v této části VA-charakteristiky.

Technologie POF se skládá ze tří hlavních komponent a to zdroje záření, konvertujícího elektrickou energii na optickou, přenosového média – nejčastěji optické vlákno a převodníku z optické energie zpět na elektrickou. Pro tento účel jsou nejčastěji používány fotovoltaické výkonové konvertory PPC. Blokovaná schémata dvou základních variant tohoto systému jsou uvedena na obrázku 1.2.



(a)



(b)

Obrázek 1.2: Blokované schéma a) Systému využívajícího jediné vlákno b) systému využívajícího více vláken.

problémy s napájením vzdáleného zařízení. Může tomu být např. v případě, že získaný výkon je natolik malý, že ho nedokáží obvody zodpovídající za získání a udržování potřebného výkonu zpracovat. Nejčastěji jsou tyto obvody realizovány jako tzv. DC/DC nebo step-up konvertory, které navíc jsou schopné vytvářet vyšší napětí, než je napětí získané na výstupu PPC. V opačném případě může deletrvající nadlimitní výkon, než je maximální povolený výkon článku článek poškodit nebo významně snížit jeho životnost.

- Vlnová délka. V závislosti na vzdálenosti je třeba také systém konstruovat i pro příslušné vlnové délky. Nejčastěji je pro účely PoF využívána vlnová délka 808 nm. Nicméně v současné době jsou také vyvíjeny i systémy s lasery o vlnové délce 980 nm. Časté využití těchto laserů také v dalších aplikacích, například jako čerpací lasery do vláknových zesilovačů, dělá tyto lasery výhodnější, co se týče poměru cena/výkon. Při použití stejných PPC článků je však účinnost převodu energie zpět na elektrickou nižší. Vlnové délky v pásmu 1550-1600 nm nejsou v současné době příliš požívány nicméně jsou vyvíjeny i PPC pro tyto vlnové délky [4],[5]. Vlnová délka také přímo souvisí s útlumem v použitých vláknech. S rostoucí vzdáleností tak může útlum optického napájecího svazku, šířeného vláknem rychle přesáhnout ztráty dané účinností laseru a také úbytky výkonu při převodu optické energie zpět na elektrickou a to i vzhledem k postupnému snižování účinnosti konverze s rostoucí vlnovou délkou. v těchto sestavách bývají také často používaná vícevidová vlákna. Optická skleněná vlákna mají na vyšších vlnových délkách (1310-1550 nm) nižší optický útlum. Sestavy využívající delší vlnové délky vyžadují pro svou realizaci použití jiných polovodičových materiálů pro PPC články, než je křemík. Nicméně v současné nabídce výrobců Broadcom a MH GOpower jsou běžně nabízeny PPC články založené právě na křemíkovém polovodiči. Při volbě vlnové délky systému je klíčová především délka optického vlákna pro napájení vzdáleného zařízení. Od určité vzdálenosti ve experimentech z literatury [6] resp. z [7] je použití vlnové délky 1480 nm od vzdáleností vyšších než 2,2 km resp. 1,3 km výhodnější i za cenu snížení účinnosti PPC článku přibližně na polovinu.

■ Příklady komerčně dostupných řešení

Na trh jsou uvedena komerčně dostupná řešení založená na principu PoF. Výrobci obvykle nabízejí přizpůsobení prodávajícího zařízení na míru zákazníka. Nabízená řešení lze rozdělit na dvě skupiny, a to s využitím společného (a obvykle jediného) vlákna pro data i záření určené pro napájení, a řešení kde jsou data a výkonový signál vedeny po nezávislých vláknech (je používáno 2 a více vláken).

Prvním příkladem je zařízení využívající právě jediné vlákno jak pro napájení tak pro přenos energie.

konektorů pro zamezení záměny vlákna přenášejícího napájecí výkon a vlákna s datovým přenosem. Při záměně by mohlo dojít k poškození vzdáleného zařízení. Zařízení používá laser pro napájení vzdáleného zařízení s vlnovou délkou $\lambda = 976$ nm a výstupním výkonem 1,25 W. Pro datovou část je používána laserová LED s $\lambda = 850$ nm a maximálním výkonem 45 μ W. Přenosová rychlost je 115,2 Kb/s. Celé zařízení lze pak napájet 100/240 v AC. Fotografie zařízení MH GoPower je uvedena na obrázku 1.4. Fotografie a parametry zařízení jsou převzaty z technické dokumentace výrobce MH GoPower [d].



Obrázek 1.4: Fotografie zařízení MH GoPower POF-VL240 - zařízení pro inteligentní vzdálený monitorovací systém. Zařízení využívá oddělených kanálů-vláken pro data a výkonové záření pro napájení zařízení [d].

RHL Industries, Inc. – Power over Fiber systém

Jako poslední příklad komerčně vyráběných zařízení uvádím systém RHL Industries, Inc. – Power over Fiber systém.

Místní jednotka obsahuje dvě vysoko-výkonové laserové LED diody, vyzařující na vlnové délce $\lambda = 830$ nm, pro napájení vzdáleného zařízení a jeden zpětnovazební přijímač. Zpětnovazební přijímač umožňuje okamžité vypnutí laserů při přerušení kontinuity vláken. K přenosu energie jsou využívány vlákna standardu OM1 s ST konektory. Zařízení umožňuje posílat vysoko-výkonové záření po třech vláknech současně. Místní jednotka je umístěna v hliníkové konstrukci. Na čelní straně jsou umístěny LED indikátory a LCD displej. Konstrukci je možné umístit do datového rozvaděče. Místní jednotka vyžaduje napájení 24-56 v DC. Zařízení využívá pro stabilizaci výkonu laserů zabudovaných superkapacitorů. Vzdálená jednotka má zabudované dva vstupy pro přijímání výkonového záření a jeden vysílač zpětné vazby. Při vzdálenosti ~ 10 m poskytuje vzdálené zařízení výstupní napětí 24 v a výkon ~ 1 W.

Snímek místního i vzdáleného zařízení je uveden na obrázku 1.5. Informace o zařízení byly převzaty z [e].



Obrázek 1.5: Fotografie zařízení RHL Industries Power over Fiber, a) místní jednotka se dvěma 830 nm lasery, b) vzdálené zařízení se dvěma vstupy a dvěma zabudovanými PPC články [e].

1.2 Optické vláknové vlnovody

Jako přenosových médií se využívá optických vláken. Jejich konkrétní parametry jsou pak určeny zejména příslušnou aplikací využívající technologii PoF. Při volbě typu použitého vlákna jsou řešeny dva protichůdné požadavky. Pro výběr vlákna je důležitá vzdálenost a množství energie potřebné pro provoz vzdáleného zařízení. Jednovidová vlákna mají obvykle nižší útlum a jsou tak používána pro zařízení, která jsou od optického napájecího zdroje vzdálenější. Umožňují také přenášet oproti vícevidovým vláknům větší šířku přenosového pásma. Menší rozměry jádra (především jednovidových vláken) ale značně snižují množství energie, které může být do vlákna navázáno. Tato zařízení má obvykle nižší příkon. Do jednovidových vláken a vláken s menšími rozměry jádra je možné navázat nižší výkon, než je tomu u vláken vícevidových nebo vláken s většími průměry jader, což potvrzují jak hodnoty v tabulce 1.3, tak výsledky uvedené na obrázku 1.10. Navazování energie do vláken s malými jádry je také komplikovanější. U vícevidových vláken díky změnám vlastností optického zdroje v čase, popřípadě vlivem okolí působícího přímo na vlákno dochází k vybuzení rozdílného rozložení vidů. Proměnlivost vidového rozložení se projeví na útlumu optického signálu šířeného vláknem. Větší průměr jádra však také umožňuje navázání a přenos většího množství energie.

Alternativním technickým řešením jsou optická vlákna s dvojitým pláštěm tzv. vlákna DCF - (DCF – Double Cladding Fiber). Vlákna s dvojitým pláštěm existuje mnoho typů (souosé profily, excentrická jádra, nekuhové profily prvního pláště apod.). Původně bylo toto vlákno vyvinuto pro optické zesilovače. V jádru DCF vlákna se šíří záření jednovidově a v prvním plášti se záření šíří vícevidově. Takto je možné přenášet současně jednovidový optický signál a vícevidové záření určené pro napájení vzdáleného zařízení. Díky rozdílným povahám navázaných optických záření dochází k minimálnímu vzájemnému ovlivnění a to i přes to, že vícevidové záření může během šíření částečně šířit i jádrem vlákna.

Další možností jsou vícejádrová vlákna (MCF – MultiCore Fiber). Jedná se o vlákna obsahující více jader současně. Rozmístění, počet a velikost jader závisí na požadované aplikaci. Jádra obvykle bývají koncipována jako jednovidová a lze je využít například v pasivních optických sítích (PON – Passive Optical Network). Díky většímu počtu jader umožňují MCF prostorový multiplex (SDM – Space Division Multiplexing).

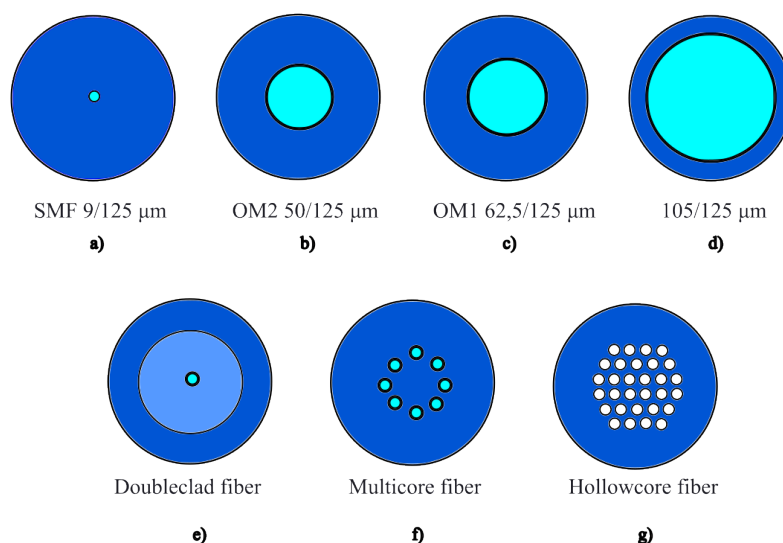
V některých situacích může docházet k přeslechům mezi jednotlivými jádry. V aplikacích, kde je tento stav nežádoucí, je důležité zvolit takové parametry optického zařízení, aby se stopy pole (MPD) navzájem nepřekrývaly. V situacích, kdy je optické zařízení určené pro napájení vzdáleného zařízení vyzařováno na jiné vlnové délce než optický datový signál, nejsou přeslechy mezi jádry MCF vlákna omezujícím faktorem.

V systémech PoF umožňují MCF vlákna přenášet větší množství optického výkonu oproti vláknům s jedním jádrem. Důvodem je rozdělení celkového výkonu do několika jader a snížení tak hustoty výkonu přenášené jednotlivými jádry. Pokud by stejný výkon nebyl rozdělen mezi jednotlivá jádra MCF a byl by šířen vláknem s jediným jádrem, mohlo by dojít k překročení bezpečného výkonového prahu vlákna a k jeho poškození. Vazba optického záření do těchto vláken je možná pomocí taperovaného MCF konektoru (TMC – Tapered Multicore fiber Connector). Konektor je tvořen jednotlivými, nejčastěji jednovidovými vlákny, jejichž druhý konec je svařen tak, aby odpovídal geometrii MCF vlákna. Jednotlivá jádra nejsou spojena do jednoho, ale zůstávají samostatná zatím co jejich pláště se spojí do jednoho. Přejechod lze využít pro navazování záření do vlákna, ale i k rozdělení záření z jednotlivých jader na výstupu [8].

Alternativním přístupem je použití 3D planárního vlnovodu, do kterého jsou pomocí laseru vytvořené vlnovody. Na vstup lze připojit jednotlivá vlákna a na výstup pak příslušné MCF vlákno [9]. Výroba popřípadě napojení TMC resp. 3D planárního vlnovodu vyžaduje vysokou přesnost. Pokud jednotlivá jádra (TMC/3D planárního vlnovodu a MCF) nejsou proti sobě zarovnána s dostatečnou přesností může se stát, že záření nebude do příslušného jádra MCF vlákna úspěšně navázáno nebo bude značně utlumeno. Vícejádrová vlákna MCF jsou však v porovnání s běžnými SMF-28 a OMx vlákny podstatně dražší.

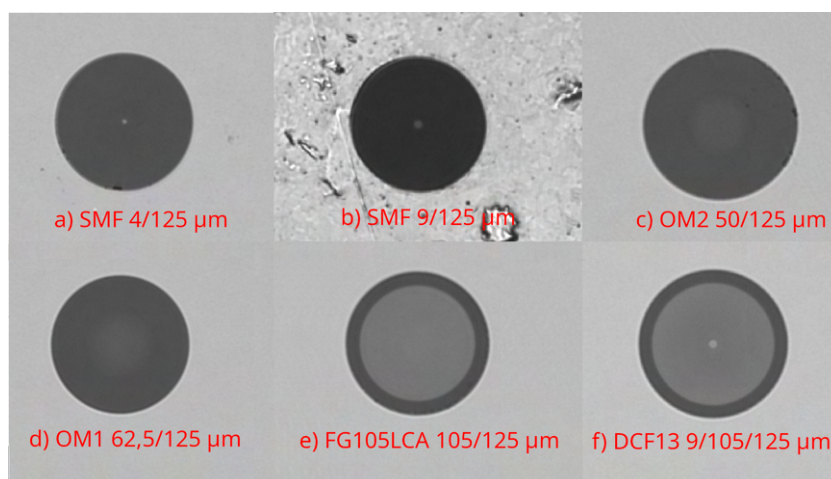
V budoucnu se také uvažuje o využití hollow-core vlákna (HCF). Tato vlákna mají díky dutému vláknům eliminovat mnoho nevýhod jako je disperse, měrný útlum, výkonové omezení. V současné době jsou ale tato vlákna stále více či méně ve fázi vývoje. Proto jsou vyráběny pouze kratší mnohdy experimentální vzorky, jejichž cena je vysoká.

Na obrázku 1.6 jsou uvedeny obrázky průřezů jednotlivými typy optických vláken, které lze používat v aplikacích PoF. Na obrázku 1.6(a) až 1.6(d) jsou zobrazené proporce vláken s jednoduchou strukturou, které jsou použité v praktické části. Na obrázku 1.6(e) až 1.6(g) jsou pak prezentovány varianty vláken, se složitější strukturou a které je možné využít při konstruování systémů PoF.



Obrázek 1.6: Příčné řezy vlákný a) jednovidové vlákno SMF o průměru 9/125 μm (jádro plášť), b) vlákno OM2 o průměru 50/125 μm (jádro plášť), c) vlákno OM1 o průměru 62,5/125 μm (jádro plášť) d) vlákno FG105LCA o průměru 105/125 μm (jádro plášť) e) vlákno s dvojitou plášťovou strukturou DCF, f) výcejádrové vlákno MCF s kruhovým uspořádáním jader g) vlákno využívajících vzduchových jader (HCF vlákno).

Na obrázku 1.7 jsou vybrané snímky všech typů v této práci používaných vláken. Snímky jsou řazeny od vlákna s nejmenším průměrem jádra 4 μm (SMF 4/125 μm) obrázek 1.6a po vlákno FG105LCA s největším průměrem jádra 105 μm (FG105LCA 105/125 μm) obrázek 1.6e. Byl také zařazen snímek vlákna DCF13 obrázek 1.6f. Na snímku na obrázku 1.7b jsou mimo jiné viditelná drobná poškození. V případě vláken na snímcích však naštěstí nebylo dotčeno (nebo jen minimálně) samotné vlákno a vlákna tak bylo možné dále používat.



Obrázek 1.7: Snímky čel vybraných vláken používaných v rámci této práce. Snímky byly pořízeny pomocí vláknového mikroskopu EXFO-FIP 400B.

Při přímém spojení vláken s odlišnými průměry jader či odlišnými hodnotami numerické apertury NA dochází vlivem rozdílných průměru vidového pole označovaných jako MFD (Mode Field Diameter) na přechodu ke ztrátám optického výkonu. Obdobě dochází ke ztrátám při navazování z optického zdroje do vlákna. Numerická apertura je bezrozměrná veličina, kterou lze definovat vztahem 1.2.

$$NA = n \sin \Phi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.2)$$

kde n je index lomu prostředí před vláknem (v tomto případě 1) Φ je úhel mezi výškou a boční stěnou kuželu akceptance, n_1 je index lomu jádra vlákna a n_2 [10]. Kužel akceptance je pomyslný kužel, který vymezuje prostor z kterého lze paprsky navázat do vlákna tak, aby byly dále tímto vláknem šířeny a nedošlo k jejich vyvázání do pláště a následném zániku paprsku (ztráta energie). U běžných jednovidových vláken se NA pohybuje v rozmezí 0,1-0,2 ($\Phi = 5,7^\circ$ - $11,5^\circ$). Existují také speciální jednovidová vlákna UHNA7 s NA 0,41 ($\Phi 24,2^\circ$). Vícevidová vlákna využívaná v této práci mají NA v rozsahu 0,2 - 0,275 ($\Phi = 11,5^\circ$ - $15,9^\circ$).

Průměr vidového pole MFD vymezuje plochu, kterou je vláknem šířena většina energie. Při uvažování Gaussovského svazku je hranice této plochy u jednovidových vláken určena jako $1/e^2$, což je $\sim 13,5\%$. U vícevidových vláken je pro zjednodušení obvykle uvažována plocha průřezu jádra. Průměr vidového pole závisí na NA (a tedy i indexech lomů jádra a pláště vlákna), vlnové délce, velikosti jádra vlákna a jeho profilech indexu lomu.

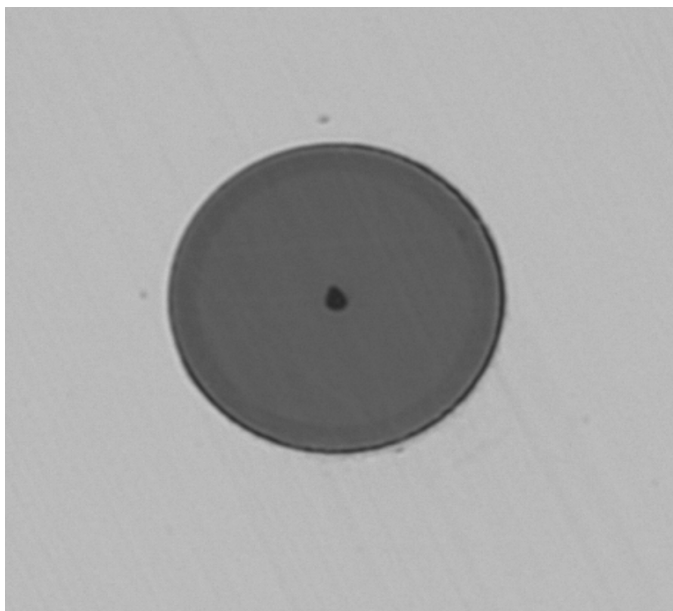
Jedním z cílů diplomové práce je navržení řešení pomocí tzv. vláknového taperu. Vláknový taper je vlákno které je v určitém úseku zúženo. Částí taperu - taperový hrdlem lze vytvořit pozvolnější přechod mezi vlákny s rozdílnými průměry jader. Vláknový taper umožňuje částečné přizpůsobení průměru vidového pole, díky čemuž na přechodu mezi vlákny dochází k nižším ztrátám (vyvázání optického výkonu). Princip výroby vláknového taperu spočívá v zahřátí vlákna na přesně definovanou teplotu za současného působení definovaného tahu. Z částí taperů pak lze vytvořit přechody pro uzpůsobení průměru vidového pole.

Při řešení diplomové práce jsem měl k dispozici jako referenční popřípadě jako vstupní vlákno FG105LCA. Vláknem FG105LCA má skokovou změnou indexu lomu. Rozměry jádra a pláště jsou 105 resp. 125 μm . Dalšími vícevidovými vlákny využívanými v této práci jsou vlákna typu OM1 a OM2. Vláknem OM1 a OM2 mají průměry jader 62,5 a 50 μm a gradientní změnou indexu lomu. Existují i vlákna OM3, OM4 a OM5 ta však v této práci nebyla používána. Vláknem OM2 až OM5 mají průměr jádra 50 μm a liší se především v technologii výroby. Díky tomu mohou být OM vlákna s vyšším číslem nasazována na delší trasy při zachování stejného bitového toku (vykazují nižší měrný útlum). Do simulací byla také zahrnuta vlákna s průměry jader 62,5 a 50 μm se skokovou změnou indexu lomu. Vláknem s průměrem jádra 50 μm se skokovou změnou indexu lomu odpovídá např. vláknem FG050LCA. Vláknem s průměrem jádra 62,5 μm a skokovou změnou indexu lomu není

pnutí apod.) ovlivňující, jak přenosové medium (vlákno), tak zdroj optického záření.

Z dostupné literatury [13],[15] vyplývá, že ke vzniku tohoto destruktivního jevu je zapotřebí určitý „spouštěč“. Ve většině případů se jedná o nečistotu, drobné poškození, nebo nedokonalosti vlákna. Obecně je proto třeba dbát obzvláště v aplikacích s vysokými optickými výkony (nejen v systémech PoF) vysoké čistoty, a dobrého stavu konektorů (konektory by neměly být mechanicky poškozené). V dobrém stavu by měla být také vlákna a ostatní optické komponenty. Při vzniku tohoto jevu dochází k trvalému poškození jádra vlákna, kdy vznikají v ose jádra „vypálená“ místa. Perioda vypálených míst pak závisí na použité vlnové délce a případně na rozložení vidů (při vícevidovém provozu) [12]. V místě, kde je fenomén Fiber-Fuse „zapálen“ na nehomogenitě (nečistota, poškození, kaz) skokově naroste teplota. Toto prudké ohřátí poté způsobí v daném místě poškození vlákna a nastartuje tak řetězovou reakci, při které začnou být ničena i místa ve směru ke zdroji. „Spálené“ místo má vysoký optický útlum a proto se poškození způsobené jevem Fiber-Fuse šíří vždy ve směru ke zdroji záření.

Vznik a průběh jevu Fiber-Fuse je doprovázen světelnými záblesky šířícími se směrem ke zdroji. V místě záblesku dochází k vážnému poškození vlákna a pokud zdroj není včas vypnut, může dojít i k poškození optického zdroje.. Rychlost šířícího se poškození je závislá na intenzitě použitého záření a materiálu vlákna. Například SiO₂ vláknech se jev obvykle šíří rychlostí několika metrů za sekundu [15]. Dle popisu v publikaci [12] je rychlost šířícího se poškození způsobeného jevem Fibre-Fuse ve vláknech POF podstatně pomalejší $\sim 0,02 \text{ ms}^{-1}$.



Obrázek 1.9: Čelo vlákna FG105LCA poškozeného vysokým optickým výkonem při nedbale očištěném konektoru. Snímek byl pořízen pomocí vláknového mikroskopu EXFO-FIP 400B.

Z podstaty šíření optického záření vláknem s gradientním profilem indexu lomu je zřejmé, že vlákna s tímto profilem budou mít nižší práh pro navázání bezpečného optického výkonu. Gradientní vlákna soustředí většinu energie do osy vlákna. V ose vlákna tak může šířená hustota překročit mez potřebnou pro „zapálení“ jevu Fiber-Fuse.

Ačkoli se nejedná přímo o případ Fiber-Fuse k poškození či dokonce vzplnutí vlákna resp. jeho obalu může dojít také při příliš ostrém ohybu nebo nedostatečně očištěných konektorech [15]. Snímek „spáleného“ vlákna je na obrázku 1.9. Obrázek 1.9 byl pořízen pomocí diagnostického vláknového mikroskopu EXFO FIP 400B. Čelo vlákna FG105LCA bylo poškozeno vysokým výkonem a nedostatečným očištěním použitého konektoru. S největší pravděpodobností tedy není vlákno poškozeno po celé své délce jako v případě Fiber-Fuse jevu, nicméně je stále pro další použití nezbytné konektor vyměnit.

Prahy maximálních provozovatelných optických výkonů ve vláknech

Literatura [7] společně s výrobcem Thorlabs uvádí významově stejný jednoduchý vztah pro výpočet prahového resp. maximálního bezpečného výkonu skleněných vláken. Tento výraz je uveden rovnicí 1.3 pro teoretický práh poškození (TDT - Teoretical Damage Treshold) vztažený k efektivní ploše šíření energie vláknem a vztahem 1.4 pro praktickou bezpečnou úroveň záření (PSL - Practical Safe Level). Hodnota PSL určuje maximální doporučený výkon, který je pro dané vlákno za dodržení běžných podmínek stále bezpečný. Hodnota TDT pak určuje teoretickou maximální hodnotu pod kterou je možné provozovat vlákno bez jeho poškození. Vláknem je možné provozovat i při výkonech vyšších, než je úroveň výkonu PSL, je však nutné aby vlákna a jejich čela byla ve velmi dobrém stavu tj. nevykazovala známky poškození a opotřebením. V případě spojů pomocí svaru je nutné, aby byl svar proveden kvalitně a vykazoval minimální ztráty. Doporučuje se optickou sestavu vždy nejprve testovat při nižších výkonech.

$$TDT = s_{ef} \cdot c_{TDT} = \pi \left(\frac{MFD}{2} \right)^2 \cdot c_{TDT}, \quad (1.3)$$

$$PSL = s_{ef} \cdot c_{PSL} = \pi \left(\frac{MFD}{2} \right)^2 \cdot c_{PSL}, \quad (1.4)$$

kde s_{ef} je efektivní plocha šířené energie, MFD průměr vidového pole (MFD – Mode Field Diameter), c_{TDT} je konstanta pro teoretický práh poškození, c_{PSL} je konstanta pro praktickou bezpečnou úroveň záření. Tyto konstanty jsou uvedené na stránkách výrobce Thorlabs. Jak výrobce upozorňuje, vztah je vztažen k průběhům Gaussiánského typu a výsledná prahová hodnota tak může být nadhodnocena. Efektivní plocha s_{ef} je v případě jednovidových vláken definována jako plocha stopy pole (MFD). Pro případ vícevidových vláken je za efektivní plochu považována plocha jádra. Konstanty c_{PSL} a c_{TDT} jsou převzaty ze stránek výrobce a jsou uvedené v tabulce 1.2. Jedná se však stále o orientační hodnoty, neboť jak bylo ukázáno v publikaci [13], dalším

aspektem, který by neměl být opomenut je množství dopantů jádra jako je GeO_2 . Měření zmíněné v daném článku prokázalo, že jednovidové vlákno SMF-28 má i přes větší MFD, nižší výkonový práh pro „zapálení“ fiber fuse, než vlákna NZDSF (NZDSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) a DSF (DSF – Dispersion Shifted Fiber). Důvodem pravděpodobně je vyšší dotace jádra oxidem germaničitým (GeO_2) u vlákna SMF-28 oproti vláknům DSF a NZDSF. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1: Prahové hodnoty výkonových hustot pro zapálení Fiber-Fuse pro MFD při vlnové délce 1550 nm. Hodnoty byly převzaty z [13]. Tabulka uvádí příklad konvenčního vlákna SMF-28 (jádro/plášť – 8,2/125 μm), disperzně posunutého vlákna DSF a disperzně posunutého vlákna s nenulovou disperzí NZDSF.

Typ vlákna	standard	MFD (μm)	I_e (MW/cm^2)
SMF-28	(G.652.D)	10,4	1,8
DSF	(G.653.B)	8	2,2
NZDSF	(G.655.C)	9,6	2,5

Tabulka 1.2: Odhadované konstanty c_{PSL} a c_{TDT} optické výkonové hustoty na rozhraní vzduch/sklo při rozdílných provezech laseru pro běžná křemenná vlákna. Hodnoty byly převzaty ze stránek prodejce Thorlabs [14].

Provoz laseru	TDT	PSL
Kontinuální režim	$\sim 1 \text{ MW}/\text{cm}^2$	$\sim 250 \text{ kW}/\text{cm}^2$
Pulzní režim (pulz 10 ns)	$\sim 5 \text{ GW}/\text{cm}^2$	$\sim 1 \text{ GW}/\text{cm}^2$

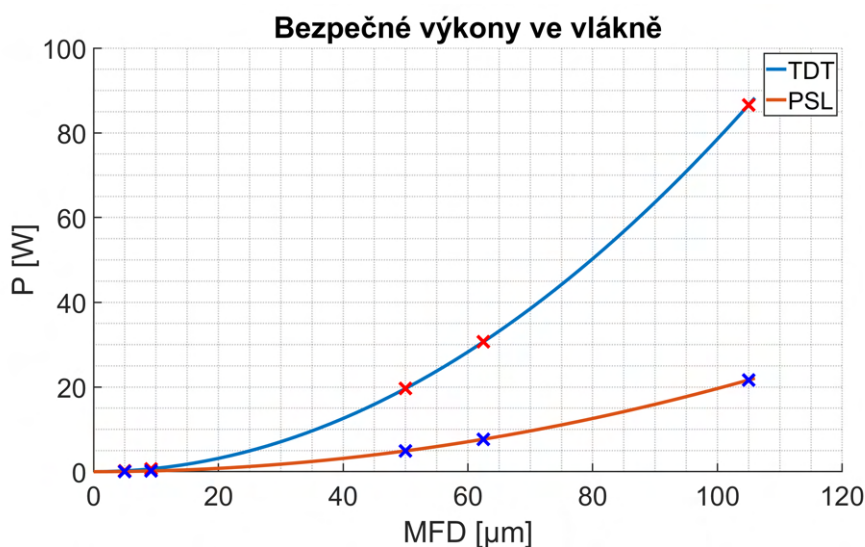
Tabulka 1.3: Vypočtené hodnoty PSL a TDT pomocí vztahů 1.3 a 1.4. Výsledek je uveden pro vybrané SiO_2 vlákna použitá v této práci. Pro porovnání s experimentálně ověřenými hodnotami z [13] uvádím také výpočet pro NZDSF (NZDSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) a DSF (DSF – Dispersion Shifted Fiber). Uvažované hodnoty platí pro lasery s kontinuálním provozem.

Jednovidová vlákna			
Označení vlákna	MFD (μm)	PSL (W)	TDT (W)
SMF 4 μm	5 @ 850 nm	0,05	0,19
SMF-28-J9	10,4 @ 1550 nm	0,17	0,66
DSF	8 @ 1550 nm	1,25	5,02
NZDSF	9,6 @ 1550 nm	0,180	0,72
Vícevidová vlákna - skoková změna indexu lomu			
Název vlákna	Průměr jádra (μm)	PSL (W)	TDT (W)
FG050LGA	50	4,91	19,63
FG105LCA	105	21,64	86,59
Vícevidová vlákna - gradientní změna indexu lomu			
Název vlákna	Průměr jádra (μm)	PSL (W)	TDT (W)
GIF50C	50	4,91	19,63
GIF625	62,5	7,66	30,67

Tabulka 1.3 uvádí hodnoty TDT a PSL pro vlákna, která jsou v této práci uvažována tj. jednovidová vlákna SMF 4 μm a SMF-28-J9 s průměrem jádra 4,4 μm resp. 8,2 μm . Z vícevidových vláken se skokovou změnou indexu lomu jsou uvažována vlákna s průměrem jádra 50 μm (vlákno FG050LGA) a 105 μm vlákno FG150LCA. Vícevidová gradientní vlákna jsou zastoupená vlákny OM1 s průměrem jádra 62,5 μm (GIF625) a vlákny OM2 s průměrem jádra 50 μm (GIF50C). Všechna vlákna uvedená v tabulce 1.3 mají průměr pláště 125 μm .

Z obrázku 1.10 je patrné, že prahové hodnoty TDT a PSL se exponenciálně zvyšují s rostoucí plochou stopy pole (jednovidová vlákna) resp. S průměrem jádra vlákna (vícevidová vlákna). Graf nezohledňuje rozdílné koncentrace dopantů a rozdílné profily indexů lomu vláken uvažovaných v této práci.

Abychom mohli přenést co největší výkon potřebujeme, aby energie vlákna byla šířena v pokud možno co největší ploše, tak aby v žádném bodě této plochy nedocházelo k překročení limitní hustoty výkonu. Z toho také vyplývá, že použití gradientních optických vláken je ve většině případů nevhodné, neboť tato vlákna ze svého principu koncentrují většinu výkonu do prostoru osy vlákna. Rovnice 1.3 a 1.4 však profil indexů lomů jader nezohledňují. Vypočtené hodnoty byly vyneseny do grafu na obrázku 1.10 a vyznačeny křížky. Pro zvýraznění povahy kvadratického růstu hranic bezpečného výkonu při zvyšujícím se výkonu byly tyto body proloženy polynomem druhého řádu.



Obrázek 1.10: Výkonové prahy pro v této práci uvažované průměry vláken. Křížky jsou vyznačeny průměry jader vláken, použitých v této práci. Graf nezohledňuje rozdílné koncentrace dopantů a rozdílné profily indexů lomu vláken uvažovaných v této práci.

1.3 Fotovoltaické výkonové převodníky

Jednou z nejdůležitějších součástí v systémech PoF jsou převodníky optického záření zpět na elektrickou energii. Pro výkonové aplikace se používají speciální k tomu určené PPC články (PPC – Photovoltaic Power Converter). PPC se skládá z jedné nebo více fotodiod zapojených ve fotovoltaickém režimu (čtvrtý kvadrát VA charakteristiky). PPC se oproti článkům instalovaným za účelem výroby energie ze slunečního záření se konstrukčně liší. Dle jednotlivých konstrukčních variant článků a konfigurací systému PoF pohybuje účinnost mezi 50-70 %. Nejčastěji se v současné době využívají konstrukce, kdy má polovodič jeden přechod (single-junction) nebo je vícepřechodový (multi-junction).

V případě varianty kdy je použit polovodič s jedním přechodem (single-junction) se jedná o jednovrstvý článek. Tento článek je konstrukčně snazší, neboť je zde samotná fotodioda tvořena pouze jednou vrstvou. Výstupní napětí těchto článků je však poměrně nízké a tak jsou ve většině případů navíc potřebné další obvody, které nízké vstupní napětí stabilizují (DC/DC konvertory), popřípadě dle potřeby napájeného zdroje navýší výstupní napětí (stand-up konvertory).

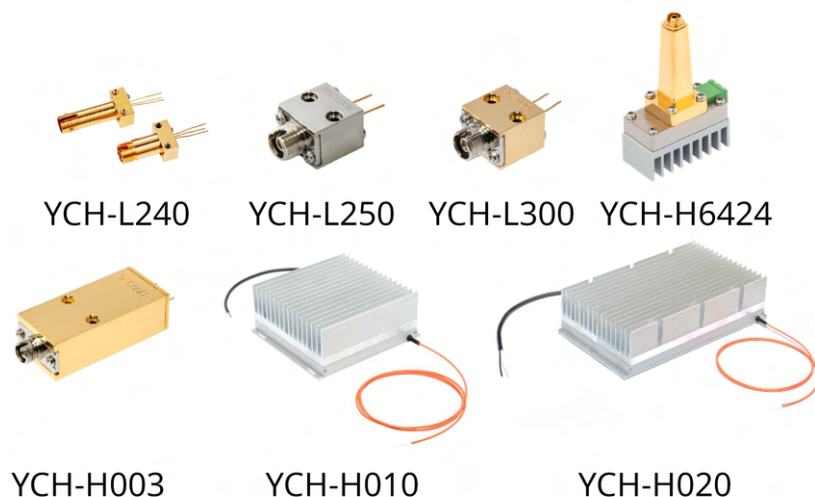
Články PPC tvořené více p-n přechody jsou do určité míry nástupcem článku jednovrstvých článků s jedním p-n přechodem. PPC články s více p-n přechody se skládají z více vrstev a jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou propojené pomocí tunelové diody. Výstupní napětí je pak u vícevrstvých článků i několikanásobně vyšší, než u jejich jednovrstvých předchůdců a jsou tak pro většinu aplikací PoF výhodnější. Vícevrstvé PPC také vykazují větší odolnost proti nepřesnému zarovnání svazku, mají větší efektivitu u polí s nerovnoměrně rozloženou energií či při nerovnoměrném osvětlení v porovnání s jednovrstvými články. Vícevrstvé PPC jsou nejčastěji vyráběny metodou metalorganické chemické depozice z plynné fáze (MOCVD – Metalorganic Chemical Vapour Deposition). Metoda růstu tenkých polykrystalických struktur MOCVD je často používaná k výrobě monokrystalických struktur [4], [5].

Jistou alternativou k vícevrstvým PPC článkům mohou být multisegmentové planární PPC, často také zvané jako pizza konfigurace [5]. Pizza konfigurace PPC články mají obvykle širší spektrum pracovních vlnových délek, protože jednotlivé segmenty využívají polovodičů s jedním přechodem. Takto konfigurace však je citlivější na zarovnání optického svazku a pole s nerovnoměrně rozloženou energií. Navíc tato konfigurace trpí většími odporovými ztrátami z bočního vedení proudu uvnitř polovodičových vrstev. Ačkoliv i zde jsou zkoumána další vylepšení, v současnosti se jeví vertikální vícevrstvé PPC články pro systémy PoF díky vyšší účinnosti jako nejvhodnější [5].

PPC články pro aplikace v systémech PoF pracujících obvykle na vlnových délkách 808 nm. V současnosti jsou však častěji v optoelektronice používány zdroje záření na vlnových délkách 980 nm. Díky sériové výrobě se tyto zdroje stávají oproti zdrojům na jiných vlnových délkách cenově výhodnějšími.

Tabulka 1.4: Tabulka vybraných parametrů PPC vertical multi-junction článků Si MIH[®] MH GoPower řady YCH. Parametry byly přebrány z technických dokumentací jednotlivých modelů ze stránek výrobce [f]. Vybírány byly nejvyšší vstupní výkon, pro které výrobce u daného modelu uvádí výstupní parametry.

Model	L240	L250	L300	H6424	H003	H010	H020
Vstupní optický výkon P_{in} (W)	3,5	3,0	3,0	20	20	50	100
Elektrický výkon $P_{out-max}$ (mW)	824,3	719,2	876,0	5 367	5 210	11,0	21,2
Max. výstupní napětí $U_{out-max}$ (V)	6,5	6,9	7,4	17,2	17,4	16,1	14,1
Max. výstupní proud $I_{out-max}$ (mA)	126,2	104,2	118,9	312,4	300,0	683,7	1 500
Účinnost při P_{in} (%)	23,6	24,0	29,2	26,8	26,0	22,0	21,2
Chladič	malý	malý	malý	velký	velký	velký	velký



Obrázek 1.11: Fotografie PPC článků MIH[®] řady YCH od společnosti MH GoPower. Obrázky byly převzaty z dokumentací ze stránek výrobce [f].

V tabulce jsou uvedeny hodnoty pro nejvyšší výrobcem uváděný vstupní optický výkon přivedený do PPC článku. Z tohoto důvodu je v tabulce také uvedený řádek, jaký chladič byl při získávání dané hodnoty použit. Většina modelů (mimo YCH-H003 a YCH-H6424) mohou být osazené pouze jednou z varian pasivního chladiče. Výrobce hodnoty uváděné v tabulce měřil za použití laseru vyzářujícího na $\lambda = 975$ nm při teplotě 25°C bez použití aktivního chlazení.

Kapitola 2

Návrh vazebních členů vhodných pro systémy PoF

Systémy PoF využívají obvykle polovodičových optických laserů. Obvyklým optickým výstupem těchto zdrojů je buď přímo optické vlákno nebo konektor, kterým lze vlákno připojit. v rámci této práce bylo k výstupnímu konektoru, popřípadě vláknu vždy připojeno vlákno FG105LCA s průměry jádro/plášť 105/125 μm . Profil indexu lomu tohoto vlákna je skokový.

Existují však také optické zdroje, které svůj výstup nemají přizpůsobený po připojení optického vlákna resp. předpokládají šíření svazku volným prostorem (free space). Zdroje přenášející optický výkon volným prostorem však nejsou jako zdroje energie v aplikacích PoF obvykle používány. Důvodem je bezpečnostní limit optického výkonu pro bezpečnost okolí a také nestálost přenosových podmínek vlivem okolí. Nicméně optické členy, kdy je optický výkon šířen volným prostorem na krátkou vzdálenost lze použít pro vazbu energie mezi vlákny s rozdílnými optickými vlastnostmi. Je však nutné, aby výkon navazovaný z prvního do druhého vlákna nepřekračoval výkonový práh, který je pro provoz vlákna bezpečný viz kapitola 1.2.

Tato kapitola představuje návrh metod vazby optického výkonu mezi vlákny s rozdílnými optickými a geometrickými vlastnostmi. V kapitole jsou uvažovány dvě metody vazby signálu mezi vlákny s rozdílnými parametry zejména pak průměry jader a vidových polí (MFD). V části 2.1 je uveden návrh vazby mezi vlákny pomocí vláknového taperu. Část 2.2 prezentuje návrh vazby mezi optickým zdrojem a vláknem, popřípadě mezi dvěma vlákny pomocí čočkové klece, která usměrňuje optický svazek a snaží se jej navázat do optického vlákna.

K modelování jednotlivých návrhů jsem použil simulační prostředí BeamPROP společnosti RSoft. Bližší popis volby vstupních parametrů, nastavení prováděných simulací a zkoumaných dat popisuje kapitola 3.

2.1 Vazba pomocí optického vlákna

V této kapitole je postupně představeno devět mnou navržených tvarů taperového hrdla. Účinnost vazby u navržených tvarů taperových přechodů byla porovnána s profily taperových přechodů předdefinovanými v programu Be-

amPROP. V simulacích byl zkoumán především vliv délky a tvaru taperového hrdla na efektivitě vazby z vlákna FG105LCA do vlákna OM2 (popř.) OM1. V simulacích bylo uvažováno vytvoření taperu z vlákna FG105LCA a bylo tomu tak i při jeho výrobě. Snahou je pomocí simulací ověřit, které tvary taperových přechodů by mohly zvýšit účinnost přenosu energie v případě, kdy navazované vlákno má podstatně menší průměr jádra (v našem případě 50 μm).

Všechny nákresy taperů zachycených na kopiích obrazovky jsou vzhledem k značnému nepoměru rozměrů v jednotlivých osách vyobrazeny v poměru 50:1. Pro větší názornost byly tyto schématické obrázky doplněny kótami s rozměry a matematickým popisem, kterým je daný taper nebo jeho úsek definován.

V prvním kroku byly modelovány tapery, jejichž matematický popis tvaru taperového hrdla je již předdefinován v programu BeamPROP. Jmenovitě jde o lineární, exponenciální a kvadratický průběh (obrázky 2.1(a)-2.1(c)).

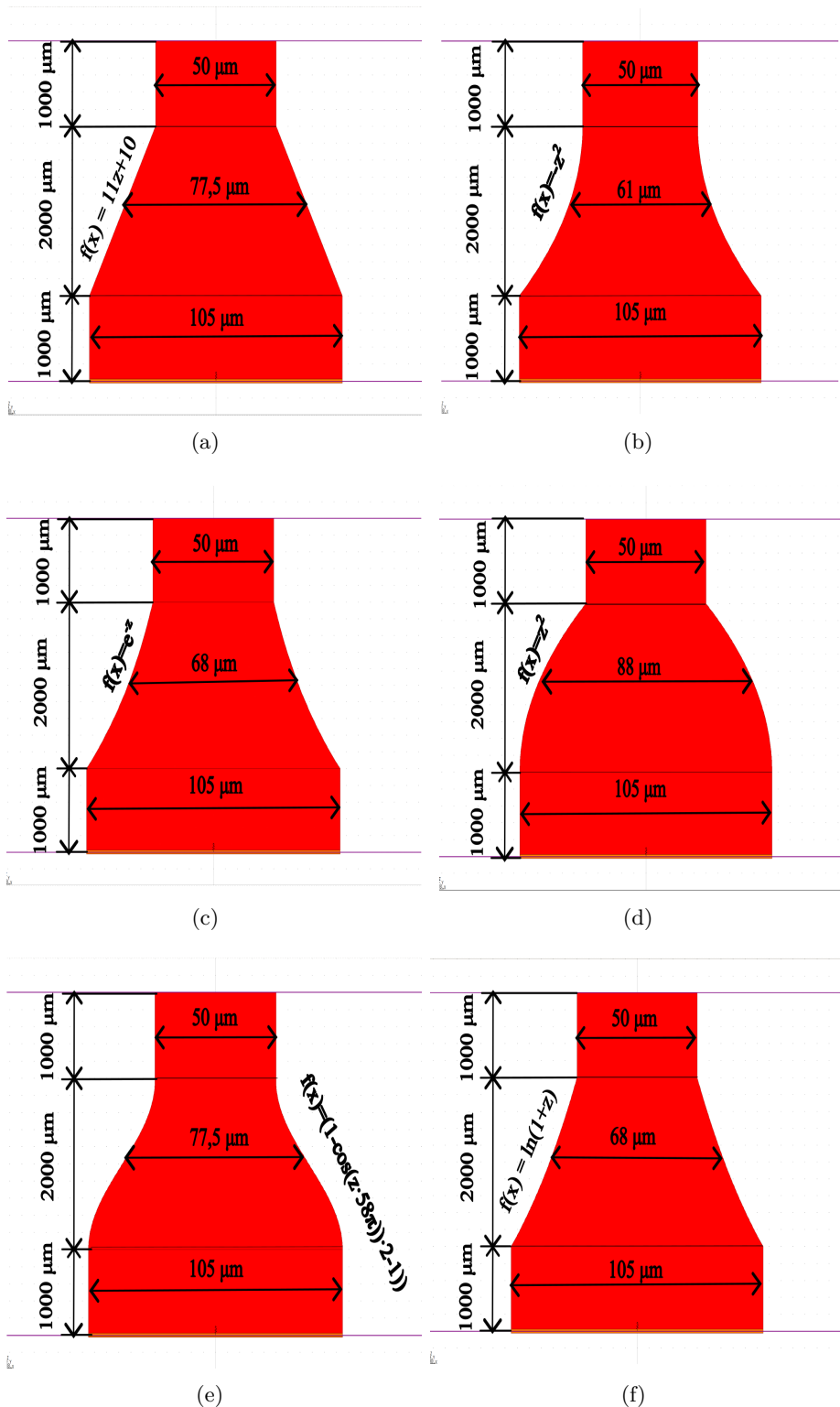
Následně byly definovány a namodelovány tři vlastní tvary taperového hrdla – kvadratický, kosinový a logaritmický (obrázky 2.1(d)-2.1(f)). Tvary těchto tří navržených taperových přechodů lze zapsat pomocí vztahů 2.1.

$$z^2; \frac{1 - \cos(\pi \cdot 58 \cdot z)}{2}; \ln(1 + z), \quad (2.1)$$

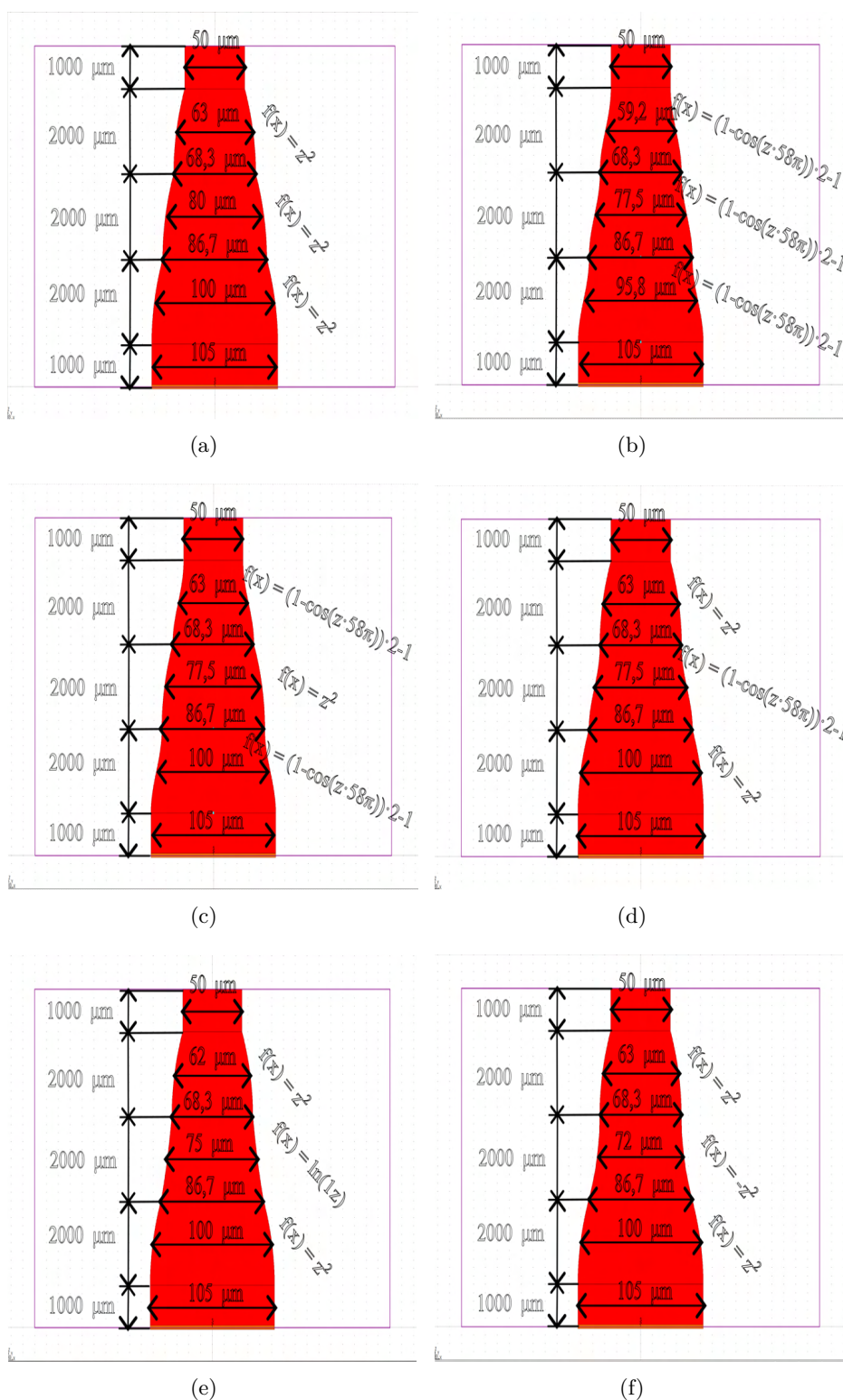
kde z je monotónně rostoucí proměnná v intervalu $\langle 0,1 \rangle$, s krokem 0,01. Tvar hrdla taperu byl tedy definován ve 101 bodech (první bod $z = 0$). Počet bodu jsem volil takový, aby křivka definující přechod byla dostatečně hladká.

Kombinací těchto třech taperových profilů a jednoho předdefinovaného v prostředí BeamPROP bylo vytvořeno dalších šest taperových profilů. Se-stavené taperované přechody jsou jsou kombinací tří po sobě navazujících taperů z obrázku 2.1(a)-2.1(c) jsou na obrázku 2.2.

Vertikální kóty na obrázcích 2.1, 2.2 vyznačují délky jednotlivých úseků vlákna. Pro simulace byl vždy zvolen úsek vstupního resp. výstupního vlákna o délce 1000 μm . Volba těchto délek předpokládá dostatečnou stabilizaci optického svazku a zároveň nezvyšuje nároky na výpočetní výkon více než je nezbytné. Délky taperových přechodů byly voleny tak, aby výkon na výstupu byl pokud možno co nejvíce ustálený. Vrchní a spodní horizontální kóta představuje průměr vstupního resp. výstupního jádra vlákna. Ostatní horizontální kóty vyznačují průměr jádra v polovině taperového přechodu. V případě kombinovaných taperů, které se skládají ze tří taperových přechodů je vyznačen průměr jádra v polovině každého dílčího přechodu a na jeho začátku a konci.



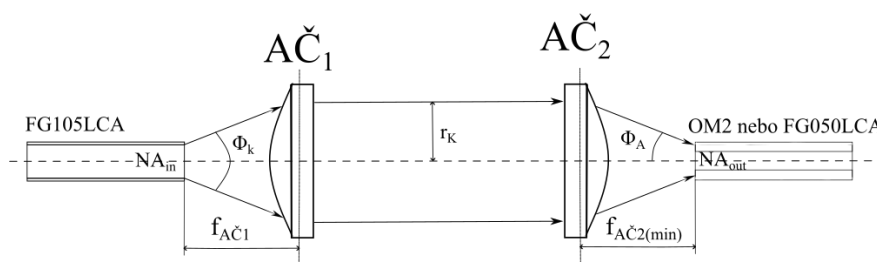
Obrázek 2.1: Propojovací přechody tvořené tapery (kónicky se sužující vlákna v směru šíření záření) předdefinované v prostředí BeamPROP a) s lineárním, b) exponenciálním, c) kvadratickým tvarem hrdla taperu. Tvary taperu navržené v rámci práce d) s kvadratickým průběhem, e) kosinovým průběhem f) logaritmickým průběhem.



Obrázek 2.2: Taper složený ze tří dílčích úseků a) $3 \times$ kvadratický úsek, b) $3 \times$ kosinový úsek, c) kosinový-mnou definovaný kvadratický-kosinový úsek, d) můj def. kvadratický-kosinový-můj def. kvadratický, e) můj def. kvadratický-logaritmický-můj def. kvadratický f) můj def. kvadratický-předef. kvadratický-můj def. kvadratický.

2.2 Optický vazba volným prostorem

Pro vazbu optického svazku šířeného volným prostorem jsem navrhl systém stávající ze soustavy dvou čoček, konkrétně jedné kolimační a jedné fokusační. Zdrojem signálu je signál vycházející z vlákna (mnou uvažovaná situace), a nebo přímo ze zdroje signálu např. laseru. Tento signál v kuželu, který je vymezen NA vstupního vlákna dopadá na kolimační čočku AČ1 umístěnou ve vzdálenosti f_1 (její ohniskové vzdálenosti). V mém případě se jedná o asférickou čočku, proto AČ1 – A-asférická Č-čočka 1. Od ní putuje zkolimovaný svazek k asférické čočce AČ2, která svazek fokusuje do požadovaného odchozího vlákna. Umístěného v ohniskové vzdálenosti AČP2 (f_2). Takto řešená optická vazba umožňuje v mnoha případech lepší efektivitu vazby oproti předchozímu zmíněnému případu ale obvykle je také nákladnější a časově pak méně stálá – je třeba systém čoček doladovat [21]. Vstupním klíčovým parametrem pro výběr komponent optické soustavy je dle [18] závislá především na výstupní NA zdrojového vlákna a požadované vlnové délce. Výrobce také doporučuje, aby kolimační čočka měla alespoň dvojnásobnou NA oproti zdroji optického signálu (v tomto případě vlákno FG105LCA s NA 0,22).



Obrázek 2.3: Schematický náčrt sestavy čoček pro zlepšení vazby výkonového optického záření mezi vlákny s průměrem jádra 105 μm a 50 μm .

Pro můj návrh jsem jako kolimační čočku AČP1 zvolil C330TMD od společnosti Thorlabs. Nutno dodat, že čočka byla také volena na základě již dostupného vybavení v laboratoři zejména pak nastavovacích upevňovacích ploch s příslušným závitem. Zároveň byla volena čočka s co nejmenší efektivní ohniskovou vzdáleností tak, aby celková konstrukce vazební klece byla pokud možno co nejmenší. Dle materiálu jenž uvádí výrobce na svých stránkách lze pak dopočítat poloměr svazku r_k za AČ1 pomocí vztahu 2.2.

$$r_K = f_1 \cdot \text{tg} \left(\frac{\Phi_k}{2} \right) \quad (2.2)$$

Kde Φ_k je uhel který, svírá uhel akceptance (úhel vyzařovaného svazku). Je důležité aby vybíraná fokusační čočka měla větší propustný průměr, než je průměr kolimovaného svazku. Následně je třeba určit velikost akceptačního úhlu výstupního vlákna do kterého má být paprsek navázán. Ten lze určit jako $\Phi_A \approx \arcsin(\text{NA}_{AČ2})$. Mezi akceptančním úhlem vlákna, do kterého je

navazován paprsek, poloměrem svazku r_k a fokusační vzdáleností $f_{A\check{C}2}$ platí vztah 2.3:

$$\Phi_A \geq \cotg\left(\frac{r_k}{f_{A\check{C}2}}\right) \quad (2.3)$$

Z nerovnice pak pomocí jednoduchých úprav lze vyjádřit $f_{A\check{C}2}$ vztahem 2.4:

$$f_{A\check{C}2} \geq \frac{r_k}{\text{tg}(\Phi_A)} \quad (2.4)$$

Pomocí výše uvedených vztahů (2.2,2.3,2.4) byly určeny hodnoty uvedené v tabulce 2.1. Na základě hodnot uvedených v tabulce 2.1 byla vybrána kolimační čočka A110TM. Parametry kolimační čočky A110TM jsou uvedeny v tabulce 2.2. Volba této čočky je také dána možností jejího (po příslušném přenastavení) použití pro všechna uvažovaná navazovaná vlákna, která jsou uvedeny v tabulce 2.1. Poloměr svazku za čočkou AČP1 je závislý na ohniskové vzdálenosti čočky AČP1 a na NA vstupního vlákna. Při výpočtech bylo jako vstupní vlákno uvažováno FG105LCA a čočka C330TMD s ohniskovou vzdáleností 3,1 mm. Poloměr svazku r_k tak vychází 0,69 mm.

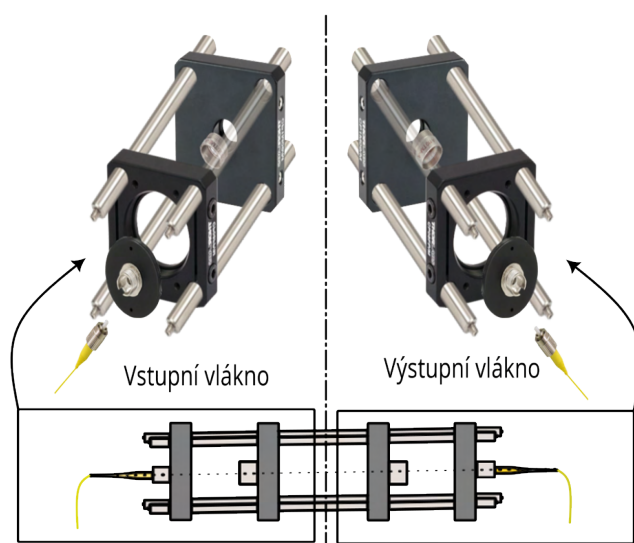
Tabulka 2.1: Uvažovaná navazovaná vlákna a parametry určené pomocí vzorců 2.2,2.4.

vlákno	NA (-)	$f_{A\check{C}2(\text{min})}$ (mm)
FG050LGA/ Molex 50/70 μm	0,22	3,10
OM2 (GIF50)	0,20	2,21
OM1 (GIF625)	0,275	2,44
SMF-28	0,14	4,94
SMF 4 μm	0,13	3,43

Tabulka 2.2: Parametry čoček klíčových pro jejich výběr při konstrukci vazebního systému.

ozn. čočky	f (mm)	CA (mm)	NA (-)
C330TMD	3,1	3,84	0,7
A110TM	6,24	5,00	0,4

Na obrázku 2.4 je nastíněná konstrukce sestavy s příslušnými konstrukčními prvky od společnosti Thorlabs obrázky jednotlivých komponent jsou převzaty ze stránek prodejce komponent Thorlabs. Výsledná konstrukce oproti obrázku bude mít veškeré konstrukční prvky řazené v jediné ose, zde však pro větší názornost byla rozdělena na dvě části, které jsou vůči sobě pootočené. Seznam použitých komponent je shrnut v tabulce A.1;



Obrázek 2.4: Návrh sestavy s konkrétními prvky od společnosti Thorlab požadovanými pro realizaci fokusační klece.

Kapitola 3

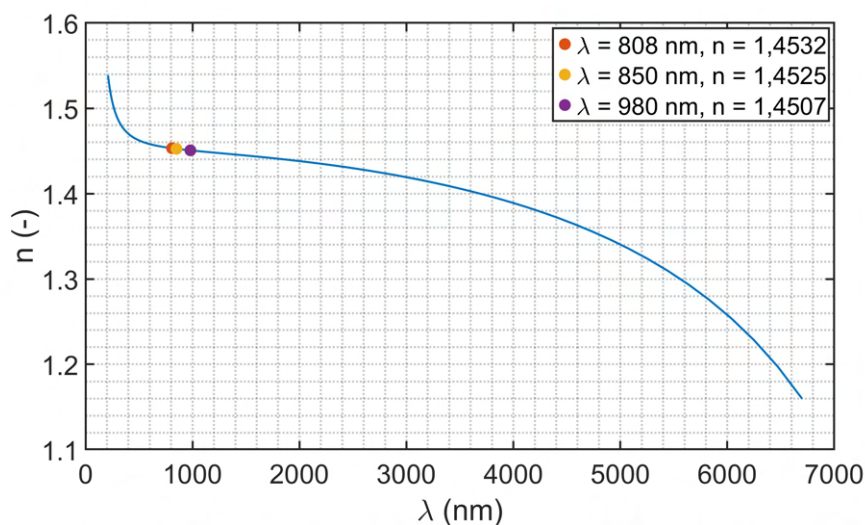
Výsledky simulací RSoft

Pomocí simulačního prostředí RSoft – BeamPROP byl simulován vliv jednotlivých typů vazeb na celkový útlum výkonu optického záření. V podkapitole 3.1 byla zkoumána účinnost vazby rozdílných typů vláken spojených svarem, ale také vliv využití taperových přechodů. U taperových přechodů byl zkoumán vliv jejich délky a tvar. Byl zkoumán vliv NA (numerické apertury) na efektivitu přenosu a jak u spojů s taperovými přechody tak u spojů s přímým napojením pomocí svaru. Podkapitola 3.2 se zabývá simulacemi, které ověřují efektivitu vazby pomocí soustavy čoček.

V rámci simulací jsem ověřoval účinnost přenosu při přímém napojení uvažovaných vláken na zdrojové vlákno FG105LCA o průměru jádra 105 μm . Byl zkoumán vliv průměru jádra navazujícího vlákna a vliv použití vláknového taperového přechodu. U taperových přechodů byl předmětem zkoumání vliv tvaru taperových přechodů a jejich délky na efektivitu přenosu. Data získaná ze simulace byla zpracována v prostředí Matlab 2022a (balíček Mathworks). Pokud není uvedeno jinak, byly pro simulaci jako výchozí použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce A.2 v příloze A.1.

Při určování indexů lomu jádra a pláště optického vlákna bylo využito následujících hodnot a úvah. Výrobce Thorlabs udává, že jádro vláken FG105LCA (105 μm) a FG050LCA (50 μm) je tvořeno čistým křemenným sklem SiO_2 . Z databáze optických materiálů na webu refractiveindex.info byla odečtena hodnota indexu lomu pro materiál SiO_2 při uvažované vlnové délce $\lambda = 980 \text{ nm}$. Index lomu jádra byl určen jako $n_1 = 1,4339$. Index lomu pláště byl určen pomocí vztahu pro numerickou aperturu $\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, při $\text{NA} = 0,22$ určena hodnota indexu lomu pláště jako $n_2 = 1,4507$. Hodnoty získaných indexů lomu, které byly použity pro simulaci společně s dalšími parametry použitých v simulacích udává tabulka A.2 v příloze A.1. V případě ostatních typů vláken OM1, OM2 a OS1/OS2 byl pro zjednodušení simulačního modelu uvažován stejný index lomu pláště. Pomocí vztahu pro NA uvedeném v tomto odstavci resp. vztahu 1.2 uvedeném v kapitole 1.2 byly dopočítávány u jednotlivých typů vláken indexy lomu jádra, tímto byl zachován vliv kontrastu indexů lomu jádro/pláště, který charakterizuje jednotlivá vlákna.

Na obrázku 3.1 je vykreslena závislost indexu lomu na vlnové délce s vyznačením třech nejčastěji používaných vlnových délek v systémech PoF.



Obrázek 3.1: Změna indexu lomu čistého křemenného skla SiO_2 . S vyznačenými indexy na vlnových délkách, které jsou nejčastěji v technologiích PoF využívány. Data pro vykreslení byla získaná z webu refractiveindex.info.

3.1 Přímá vazba vláken a vazba s využitím vláknového taperu

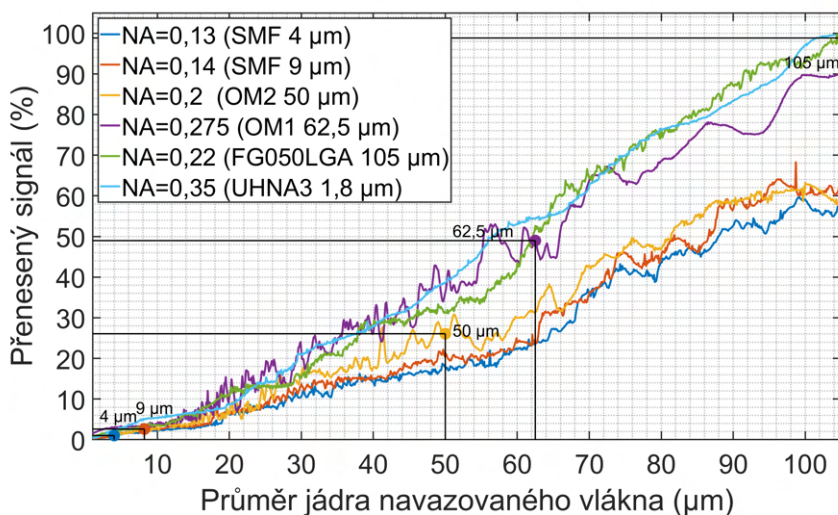
Jako první byla pomocí simulace ověřena závislost šířky jádra navazovaného vlákna na množství přenesené energie. Graf s výslednými hodnotami je uveden na obrázku 3.2.

Z obrázku 3.2 vyplývá, že ztráty na přechodu jsou nepřímo úměrné průměru jádra připojovaného vlákna. Ke ztrátě výkonu pak především dochází z důvodu nepřizpůsobení stopy pole svazku (MFD). Pro alespoň částečné přizpůsobení stopy pole lze použít vláknových taperů. V rámci taperovaného úseku také dochází k vzájemné konverzi a přelívání jednotlivých vidů. Přelívání energie mezi vidy se na výstupních grafech projevuje nejčastěji zvlněním výsledných křivek [20].

Simulovány byly průměry jader vláken od $1 \mu\text{m}$ do $105 \mu\text{m}$ a to s krokem $0,1 \mu\text{m}$. Tímto poměrně jemným krokem byly zahrnuty nejen průměry jader vláken, které jsou v této práci uvažovány, ale také většiny používaných vláken s průměry jader nacházejících se v tomto intervalu. U vláken v této simulaci byl zohledněn profil indexu lomu.

Z grafu na Obrázku 3.2 získaného z výstupních dat simulací můžeme vidět úzkou souvislost s nárůstem přenesené energie spolu s rostoucím průměrem vlákna. Z obrázku 3.2 také vyplývá, jaký má vliv má hodnota NA resp. kontrast indexů lomů pláště a jádra na celkové účinnosti vazby energie. Můžeme také pozorovat, že s vyšší NA roste také účinnost vazby. Z tohoto důvodu byla mezi simulovaná navazující vlákna zařazena také varianta s navazujícím UHNA3 vláknem, přestože nebylo v praktické části nakonec použito. Toto vlákno bylo vybráno pro svou vysokou numerickou aperturu $\text{NA} = 0,35$. Existují i UHNA

vlákna s vyšší NA (UHNA7 NA = 0,41), UHNA3 však je navrženo pro rozmezí pracovních vlnových délek 960-1600 nm, které nejvíce odpovídají vlnovým délkám používaným v systémech PoF. Rozsahu průměrů 1-105 μm uvažovaném v grafu na obrázku 3.2 lze dosáhnout například taperováním tohoto vlákna. Průměru jader u vláken uvedených na obrázku 3.2 lze hypoteticky dosáhnout například vláknovým taperováním, nebo expanzí.



Obrázek 3.2: Závislost průměru jádra navazujícího optického vlákna a jeho NA na přenesené energii.

Z obrázku 3.2 je však patrné, že vlákna s přibližně dvojnásobnou NA přinesla zlepšení účinnosti přenosu v simulovaném rozsahu šířek vláken přibližně o dvojnásobek.

Prostředí BeamPROP uvažuje při svých výpočtech také ztráty při navazování do vlákna. Z tohoto důvodu ani v případě připojení vlákna o stejném průměru jádra a stejné NA není účinnost přenosu 100 %, ale v mém případě $\sim 98,82$ %.

V grafu na obrázku 3.2 jsou dále zvýrazněny hodnoty odpovídající průměrům jader vláken zkoumaných v této práci.

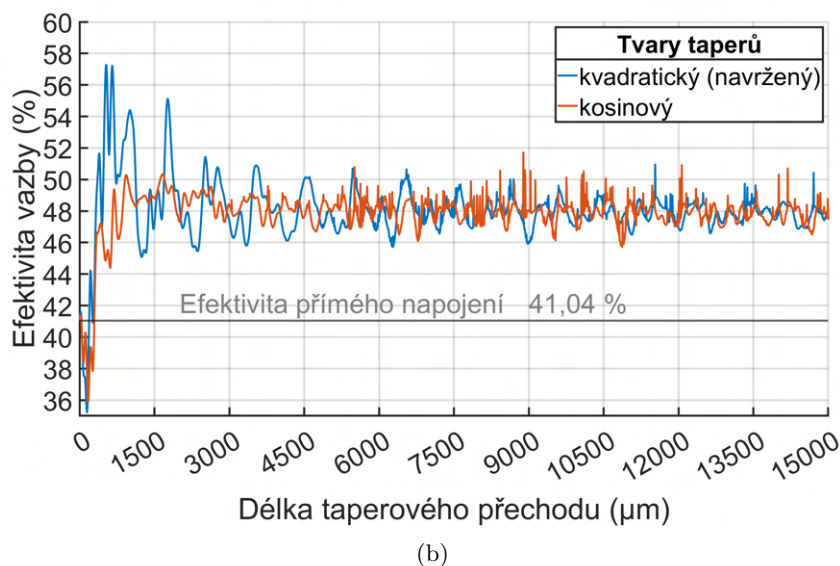
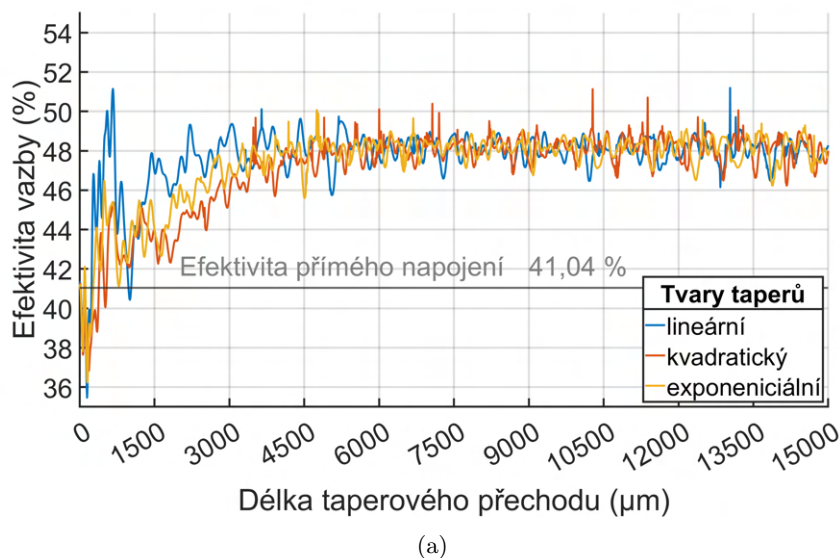
Vazba pomocí taperového přechodu

V rámci této práce jsem ve snaze nalézt řešení pro účinnější přenos energie při spojení vláken s odlišnými velikostmi jader otestoval možnost využití vláknových taperů. Následující simulace kromě hledání optimální/minimální délky jednotlivých tvarů taperů také zkoumal vliv tvaru taperových přechodů. Tři základní průběhy jsou již v prostředí BeamPROP předdefinovány. K těmto třem průběhům jsem vytvořil návrh devíti různých tvarů taperových přechodů. Tvar a parametry těchto přechodů jsou zachyceny a popsány v kapitole 2.1.

Po namodelování zmíněných taperů byly provedeny simulace, kde ve všech simulovaných případech bylo uvažováno propojení vláken o průměru jádra

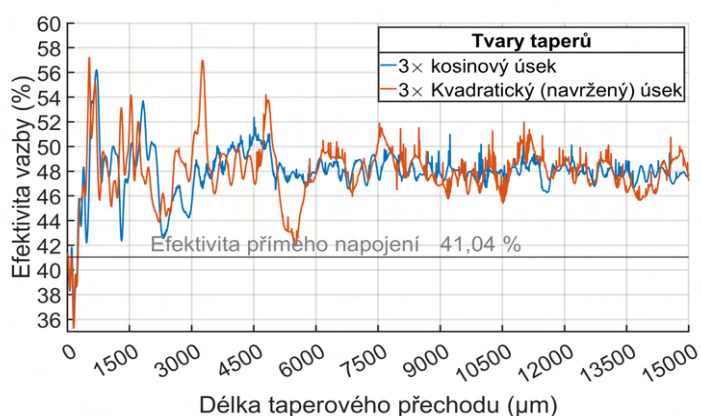
105 μm a 50 μm . Interval simulovaných délek byl nastaven od 0 (spojení bez taperu) po 15000 μm s krokem 1 μm .

Z důvodů výrazného přelivu energie mezi jednotlivými vidy, dochází ke značnému zvlnění výstupního grafu. Tento efekt je navíc podpořen tím, že v taperovaném úseku dochází vybuzování a posléze zániku některých vidů [19], [20].

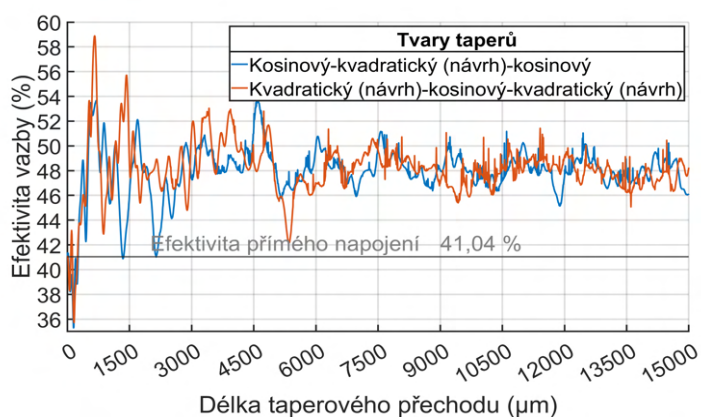


Obrázek 3.3: Účinnost vazeb při použití taperovaných vláknových přechodů v závislosti na jejich délce a tvaru a) předdefinovaných v prostředí RSoft-BeamPROP, b) navržených v rámci práce. V simulacích bylo uvažováno navazující vlákno FG050LGA 50/125 μm se skokovou změnou indexu lomu.

3.1. Přímá vazba vláken a vazba s využitím vláknového taperu



(a)



(b)



(c)

Obrázek 3.4: Účinnost vazeb při použití tří-úsekových taperovaných vláknových přechodů v závislosti na jejich délce a tvaru a) 3× kosinus a 3× kvadratický úsek, b) kombinace kosinových a kvadratických úseků, c) logaritmický resp. předdefinovaný kvadratický úsek taperu vložený mezi dva navržené kvadratické. V simulacích bylo uvažováno navazující vlákno FG050LGA 50/125 μm se skokovou změnou indexu lomu.

Ve výsledných grafech na obrázcích 3.3 a 3.4 je vyznačena účinnost vazby 41,04 %. Tato hodnota odpovídá přenosu optického výkonu v případě přímého napojení vláken FG105LCA a vlákna FG050LGA se skokovou změnou indexu lomu.

Tabulka 3.1: Průměrná účinnost přenosu pro tapery délek 3,25 mm - 15 mm, nárůst účinnosti oproti přímému spojení vlákna FG105LCA a FG050LGA se skokovou změnou indexu lomu a rozptyl hodnot

Taperové přechody BeamPROP			
Tvar taperového přechodu	Účinnost přenosu (%)	Nárůst účinnosti přenosu (%) při použití taperového přechodu	Rozptyl hodnot (%)
Lineární	47,83	6,79	±5,38
Kvadratický	47,35	6,31	±4,53
Exponenciální	47,56	6,52	±4,47
Navržené taperové přechody			
Kvadratický	48,12	7,08	±5,02
Kosinový	48,06	7,02	±3,00
3× Kosinový	48,05	7,03	±6,18
3× Kvadratický	48,07	7,03	±7,51
Kosinový/Kvadratický/Kosinový	48,03	7,01	±6,65
Kvadratický/Kosinový/Kvadratický	48,19	7,15	±6,77
Kvadratický/Logaritmický/Kvadratický	48,23	7,19	±4,90
Kvadratický/Kvadratický (BeamPROP)/Kvadratický	48,25	7,21	±4,19

Z obrázků 3.3, 3.4 a tabulky 3.1 je patrné, že použití taperového přechodu zvyšuje účinnost přenosu. Při výpočtech nebyly uvažovány hodnoty v rozsahu 0-1,5 mm. Důvodem byly neustálené hodnoty způsobené vidovými konverzemi u takto krátkých taperových přechodů. Může se zdát, že v rozsahu 0-1,5 mm dosahovaly některé délky taperových přechodů lepších přenosových vlastností, vypočtený výkon v napojeném vlákně by byl však s nejvyšší pravděpodobností posléze postupně vyvázan. Hodnoty uvedené v tabulce jsou vypočteny pro délky taperových přechodů 1,5-15 mm. Průměrný nárůst účinnosti je 6,9 %. Nejnižší navýšení účinnosti vykazovaly taperové přechody předdefinované v prostředí BeamPROP (6,31-6,79 %). Navrhovaný kosinový a kvadratický taperový přechod má oproti přímému napojení vyšší účinnost přenosu o 7,01-7,08 %. Nejvyšší nárůst účinnosti oproti případu s přímým napojením vlákna, vykazovaly přechody tvořené kombinací, kdy byl mezi navržené kvadratické přechody vložen kosinový, logaritmický nebo kvadratický přechod předdefinovaný v prostředí BeamPROP (nárůst účinnosti přenosu o 7,15-7,21 %).

Výkyvy v účinnosti přenosu při rostoucí délce taperového přechodu (v rozsahu 1,5-15 mm) byly nejnižší u kosinového taperového přechodu ± 3 %. Maximální výkyv účinnosti vazby do ± 3 % má kosinový taper od délek taperového přechodu 0,75 mm. Stabilní účinnost přenosu vykazuje i navržený kvadratický taperový přechod. Oproti kosinovému profilu se však již objevují větší výkyvy účinnosti přenosu ($\pm 4,86$ % u délek taperových přechodů delších než 1,5 mm). Nejvyšší výkyvy účinnosti v závislosti na délce vykazoval taperový přechod sestavený ze tří navržených kvadratických taperových přechodů ($\pm 7,51$ %).

Z grafu na obrázku 3.3(a) je patrné, že tvary taperů předdefinovanými v prostředí BeamPROP postupně s rostoucí délkou přechodu zvyšují účinnost přenosu až do délky taperu ~ 5 mm, kdy se účinnost přenosu ve všech třech případech ustálí na $\sim 47,74$ - $48,06$ %. Ačkoliv by se lineární profil taperu jevil jako nejúčinnější z dané trojice, z důvodu výrazného propadu účinnosti u taperových přechodů o délce ~ 1 mm, se taperové přechody o délkách kratších než 2 mm jeví jako nevhodné. Vhodnějším se pak zdá využití taperu s kosinovým profilem 2.1(e) (graf 3.3(b)), který má ze všech zkoumaných profilů nejstabilnější účinnost přenosu energie $\sim 47,94$ %.

Z obrázku 3.4 lze usuzovat, že taperové přechody tvořené třemi dílčími taperovými přechody vyžadují pro alespoň částečně ustálenou účinnost přenosu délku ~ 6 mm, než je tomu v případě taperů s jedním tvarovým profilem ~ 3 mm. Vyjímkou je taperový přechod tvořený třemi kosinovými úseky, který se ustálí již okolo délek $\sim 4,5$ mm.

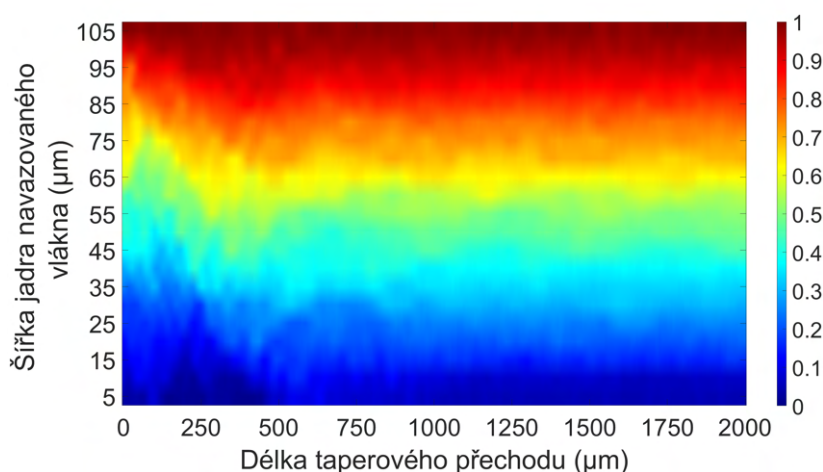
Nejnižší stabilitu přenosu vykazovaly taperové přechody kombinující tři kosinové resp. tři kvadratické úseky (2.2(a), 2.2(b)), jak je patrné na obrázku 3.4(a)) a pak jejich kombinace kosinový-kvadratický-kosinový, kvadratický-kosinový-kvadratický (2.2(c)-2.2(d)) viz obrázek 3.4(b). Míra účinnosti přenosu u těchto taperových přechodů značně kolísá do délek ~ 6 mm. Navíc v případě druhé zmíněné dvojice 3.4(b) účinnost přenosu v některých případech klesá pod účinnost vazby přímého napojení. Ze zkoumaných kombinovaných taperů je nejlepších výsledků dosaženo u taperových přechodů 2.2(e), 2.2(f), jejichž průběhy závislosti jsou zachyceny na obrázku 3.4(c).

Z obrázku 3.4(c) je patrné, že účinnost vazby taperového přechodu složeného kvadratického, logaritmického a kvadratického taperového přechodu taperů nad $45 \mu\text{m}$ neklesne pod $45,2$ % s výjimkou jediného propadu, při délce $\sim 5,3$ mm, kdy účinnost vazby klesla na $44,4$ %.

Výroba taperovaných přechodů tvořených kombinací jednotlivých profilů tak, jak je uvedeno v návrhu bude vzhledem ke své složitosti náročná na výrobu. Navíc se zdá, že vliv tvaru taperového přechodu má na celkovou účinnost vazby malý vliv, neboť rozdíl účinnosti vazby mezi nejlepším a nejhorším tvarem taperového přechodu byl pouze $0,9$ %.

V rámci simulací zkoumajících taperové přechody byla v provedena simulace, ve které byly zároveň měněny parametry délky lineárního taperu i šířky navazujícího vlákna. Aby byl počítač, na kterém byly simulace spuštěny schopen úspěšně dokončit (nebyly překročeny nároky na paměť) bylo třeba zvolit dostatečně hrubý krok. Zkoumané rozmezí průměrů jader je od 5 do $105 \mu\text{m}$ s krokem $5 \mu\text{m}$. Délka taperového hrdla byla pak měněna v rozmezí

0 (přímé napojení vláken) po 2 mm s krokem 5 μm . Výsledkem je pak barevná mapa, kdy na svislé ose se odpovídajícím způsobem mění průměr jádra vlákna a osa x popisuje délku použitého taperového přechodu obrázek 3.5. Obdobně jako u lineárního taperového přechodu na obrázku 3.3(a) je i na obrázku 3.5 možné spatřit nižší pokles účinnosti vazby pro tapery $\sim 0\text{-}250 \mu\text{m}$. s rostoucím průměrem navazujícího vlákna se pokles účinnosti vazby projevuje při stále kratších taperových přechodech. Výsledky simulace stejně jako v předchozích případech ukazují, že hlavním ukazatelem pro odhad účinnosti přenosu spoje je průměr jádra navazujícího vlákna.



Obrázek 3.5: Přenesený výkon v závislosti na délce použitého lineárního taperového přechodu a vlákna s odpovídajícím průměrem jádra.

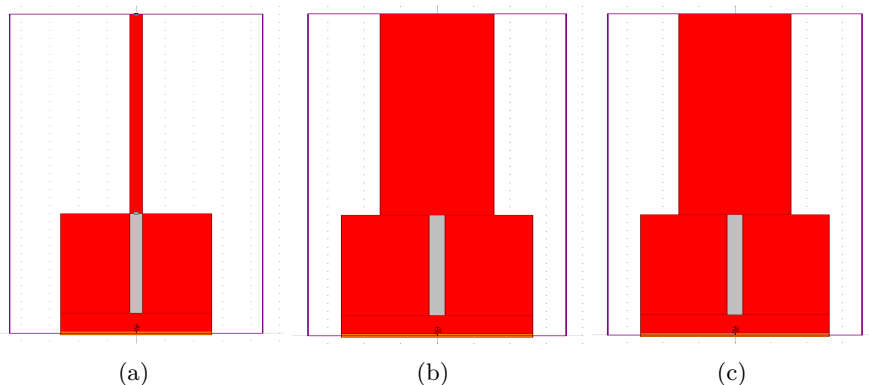
Vazba s využitím vlákna s dvojitou plášťovou strukturou

Jedním z návrhů je použití DCF vlákna pro zvýšení účinnosti vazby mezi vlákny s rozdílnými průměry jader. V prostředí BeamPROP byly namodelovány spojení využívající úseku vlákna s dvojitou plášťovou strukturou (DCF vlákno). Modelované spoje jsou uvedeny na obrázku 3.6.

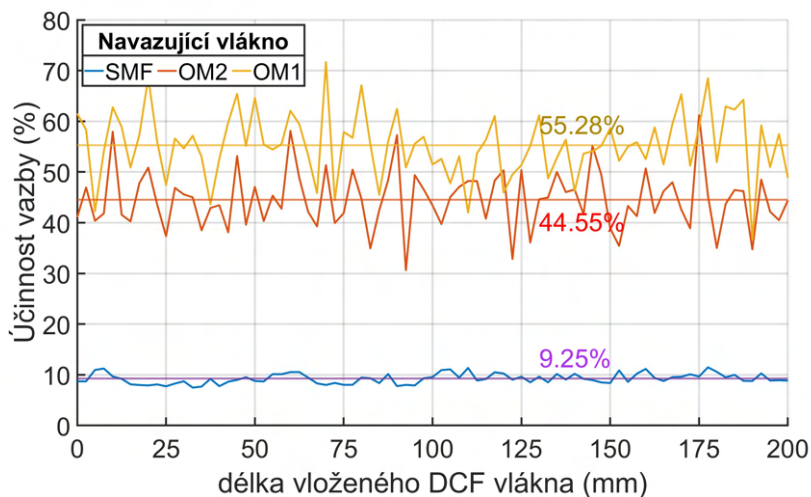
Z důvodu výpočetní náročnosti simulované vazby s DCF vlákny byly simulace prováděny pouze ve 2D. Uvažovaná vlnová délka byla 980 nm. Nejprve jsem se v simulacích zaměřil na závislost délky použitého úseku DCF vlákna na účinnosti vazby optického záření do navazujícího vlákna. Byly simulovány celkem tři typy navazujících vláken SMF 9 μm , FG050LGA a vlákna s velikostí jádra 62,5 μm a skokovým profilem indexu lomu. Závislost délky vlákna na účinnosti vazby udává obrázek 3.7. Simulovány byly délky DCF vlákna v rozmezí 0 (vazba bez DCF vlákna) až 250 mm.

Z obrázku 3.7 je patrné, že účinnost vazby se s rostoucí délkou DCF vlákna zásadně nemění. Výkyvy v účinnostech vazby se zvětšující délkou vloženého DCF vlákna jsou s největší pravděpodobností způsobeny přelivem energie mezi jednotlivými vidy šířenými modelovanými vláknovými spoji. Na obrázku je

také uvedena průměrná účinnost vazby pro jednotlivá napojovaná vlákna. Pro potvrzení nezávislosti účinnosti vazby vyplývající z průběhů na obrázku 3.7 byla navíc provedena jedna simulace s délkou DCF vlákna 2,5 metru. Výkon zjištěný na konci tohoto úseku vzhledem k oscilacím výkonu způsobeného přelivem energie jednotlivých vidů lze výsledek považovat za totožný. Ze simulací tedy vyplývá, že použití DCF vlákna v rozmezí 0 - 2,5 metrů nemá vliv na účinnost vazby



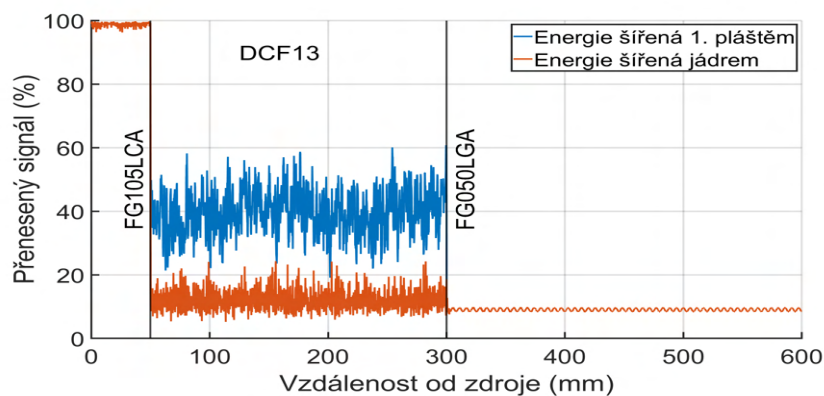
Obrázek 3.6: Vazba vláken modelovaná v prostředí BeamPROP. s navazujícím vláknem a) SMF 9/125 μm , b) FG050LGA 50/125 μm , c) vláknem 62,5/125 μm . Jádru DCF vlákna je vyznačeno šedou barvou.



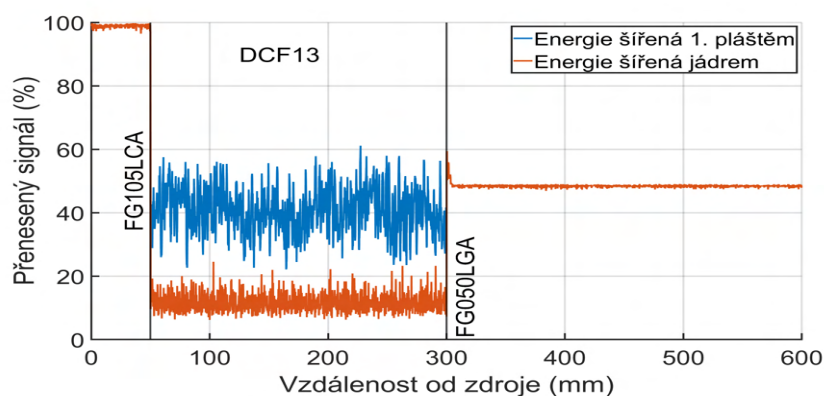
Obrázek 3.7: Výkon na výstupním vlákně FG050LGA v závislosti na délce použitého DCF vlákna. Simulovaná délka DCF vlákna je 0-200 mm.

V následujícím kroku byly modelované vzorky zkoumány pomocí monitorů pro výpočet energie šířené v úseku DCF vlákna. Úrovně výkonu šířeného jednotlivými mody uvádí obrázek 3.8. První monitor (modrý průběh) simuloval výkon šířený prvním pláštěm DCF vlákna a oranžový průběh pak šířenou energií prostřednictvím jádra DCF vlákna. Energie šířená pláštěm

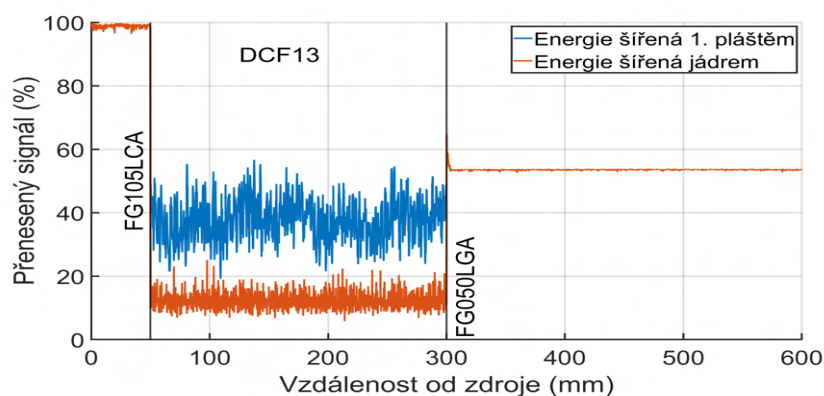
vstupního vlákna FG105LCA a výstupních vláken (SMF 9 μm , FG050LGA a vlákna 62,5 μm) nebyla uvažována, neboť se průběh udávající celkovou energii šířenou simulovanou strukturou překrýval s průběhem značícím úroveň energie šířící se jádrem.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 3.8: Měřené výkonové úrovně ve vzorcích vyživající DCF vlákno s napojeným a) SMF 9/125 μm , b) FG050LGA 50/125 μm , c) vláknem 62,5/125 μm .

Na závěr byla sledována změna účinnosti vazby při záměně vlákna se skokovou změnou indexu lomu za gradientní vlákno. Průměrné výstupní výkony při délce DCF vlákna 250 mm uvádí tabulka 3.2. Z tabulky vyplývá, že při navazování gradientního vlákna je dosaženo nižší efektivity vazby. Nejnižší rozdíl účinností vazby v závislosti na použitém profilu indexu lomu vlákna vykazují vlákna s průměrem 62,5 μm (setiny procenta), nejvyšší pak vlákna s průměrem 50 μm (vyšší jednotky procent).

Tabulka 3.2: Rozdíl účinností vazby při navazování vlákna s gradientním a skokovým profilem indexu lomu.

Průměr jádra navazujícího vlákna (μm)	Účinnost vazby (%)	
	skokový index lomu	gradientní index lomu
9	9,25	7,53
50	44,55	37,58
62,5	55,28	53,21

Vliv NA spojovaných vláken na účinnost vazby

Z výsledků simulací bylo zjištěno, že od určité délky ~ 5 mm je vliv délky taperového přechodu minimální. Správnost výsledků je potvrzená literaturou [21], která přisuzuje největší vliv vstupním a výstupním NA (NA_{in} resp. NA_{out}). Vliv NA byl zkoumán v simulacích o kterých pojednává tato část. Uvažované hodnoty NA_{in} resp. NA_{out} vycházejí ze vztahu 3.1 popisujícího zákon zachování jasu [21].

$$A_{in} n_{in}^2 \sin^2(\Phi_{in}) = A_{out} n_{out}^2 \sin^2(\Phi_{out}), \quad (3.1)$$

jelikož $n \cdot \sin\Phi = NA$ a $\frac{A_{in}}{A_{out}} = \frac{d_{in}^2}{d_{out}^2}$, kde d_{in} resp. d_{out} je průměr vstupního, resp. výstupního čela taperu, pak lze 3.1 upravit na 3.2.

$$\frac{NA_{out}}{NA_{in}} = \frac{d_{in}}{d_{out}} \quad (3.2)$$

z 3.2 lze pak určit maximální doporučenou NA_{in} jako 3.3

$$NA_{in} \leq NA_{out} \frac{d_{out}}{d_{in}} \quad (3.3)$$

V simulačním prostředí jsem provedl návrhy vazby pro napojovaná vlákna s průměry jader 4, 9, 50 a 62,5 μm . U těchto vláken byl posléze zkoumán vliv NA a profilu indexu lomu na účinnost vazby. Byl uvažován skokový (SI – Step Index) a gradientní (GRIN Graded Index). Vliv NA byl zkoumán na základě podmínky ve vztahu 3.3. Indexy lomů jader navazujících vláken s ideálními NA byly opět určeny pomocí rovnice $NA = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$. Hodnoty získané z těchto simulací jsou shrnuty v tabulkách 3.3 a 3.4 a dále pak v grafech na obrázcích 3.9 a 3.10.

Průměrné hodnoty uvedené v grafech na obrázku 3.9, 3.10 a v tabulkách 3.3 a 3.4 byly vypočteny vždy pouze z posledních 25 % hodnot, tak aby průměrný výsledek byl určován z pokud možno ustálených hodnot.

Tabulka 3.3: Účinnost vazby u vláken s přímým napojením pomocí svaru. V tabulce jsou uvažována vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Dále jsou uvedeny hodnoty, pro reálné NA spojovaných vláken a pro ideální NA navazujících vláken. Ideální NA (NA splňující podmínku dle vztahu 3.3) navazujících vláken má umožňovat zvýšení účinnosti vazby.

Průměr jádra (μm)	Účinnost vazby optického výkonu (%)			
	Reálná NA vláken		Ideální NA	
	Skokový index	Gradientní index	Skokový index	Gradientní index
4	0,08 %	0,06 %	0,77 %	1,37 %
9	3,15 %	1,75 %	7,41 %	10,82 %
50	29,48 %	26,47%	44,23 %	52,42 %
62,5	54,42%	50,84 %	53,62 %	60,04 %

Tabulka 3.4: Průměrná účinnost vazby u vláken s využívajících na spojích taperových přechodů v délkách 1-1,5 cm. V tabulce jsou uvažována vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Dále jsou uvedeny hodnoty, pro reálné NA spojovaných vláken a pro ideální NA navazujících vláken. Ideální NA (NA splňující podmínku dle vztahu 3.3) navazujících vláken má umožňovat zvýšení účinnosti vazby.

Průměr jádra (μm)	Účinnost přenosu optického výkonu (%)			
	Reálná NA vláken		Ideální NA	
	Skokový index	Gradientní index	Skokový index	Gradientní index
4	1,79 %	1,59 %	6,07 %	6,93 %
9	5,24 %	4,17 %	7,93 %	10,31 %
50	43,06 %	33,34 %	48,88 %	49,31 %
62,5	60,56 %	53,52 %	60,86 %	63,54 %

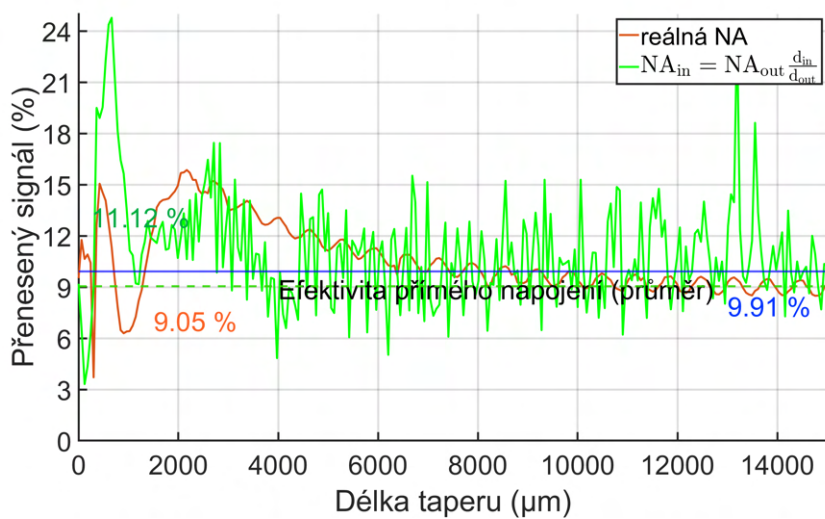
Z hodnot v tabulkách 3.3 a 3.4 vyplývá, že u vláken s reálnými numerickými aperturami mají spojení s navazujícími s gradientními vlákny (dle výstupu simulací) horší účinnost vazby oproti navazujícím vláknům se skokovou změnou indexu lomu. Vstupním vláknem je ve všech případech vlákno FG105LCA, které má skokový profil indexu lomu. Je tedy pravděpodobné, že tento pokles účinnosti vazby je způsoben právě rozdílnými profily indexu lomu. Naopak pro případ napojení vláken s ideální NA pro vazbu optického zářní ze zdá výhodnějším řešením použití gradientního vlákna.

Naopak v případě napojení vláken s ideální NA pro vazbu optického záření (dle vztahu 3.3) se zdá použití gradientních vláken, až na případ při použití taperového přechodu na vlákno 62,5 μm jako výhodnější.

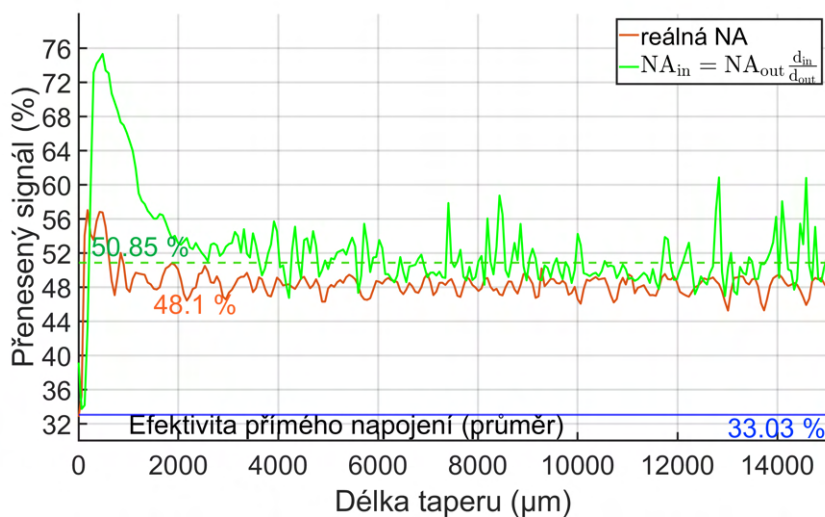
Napojení vláken s ideální NA vykazovalo ve všech případech, oproti variantě s reálnými NA, vyšší účinnost vazby. Největší rozdíl v účinnosti vazby

byl u vláken s průměrem jádra 50 μm (až 25,95 % u gradientního vlákna s přímým navařením).

Dále lze z hodnot v tabulkách 3.3 a 3.4 usoudit, že použití taperovaného přechodu oproti přímému spojení umožňuje vytvořit účinnější vazbu bez ohledu na to, zda byla dodržena podmínka požadující minimální NA navazujícího vlákna ze vztahu 3.3 či nikoliv.

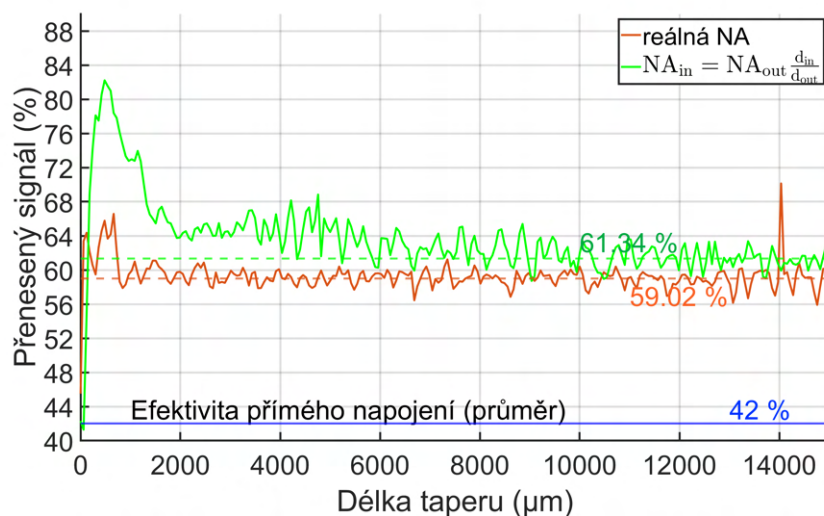


(a)

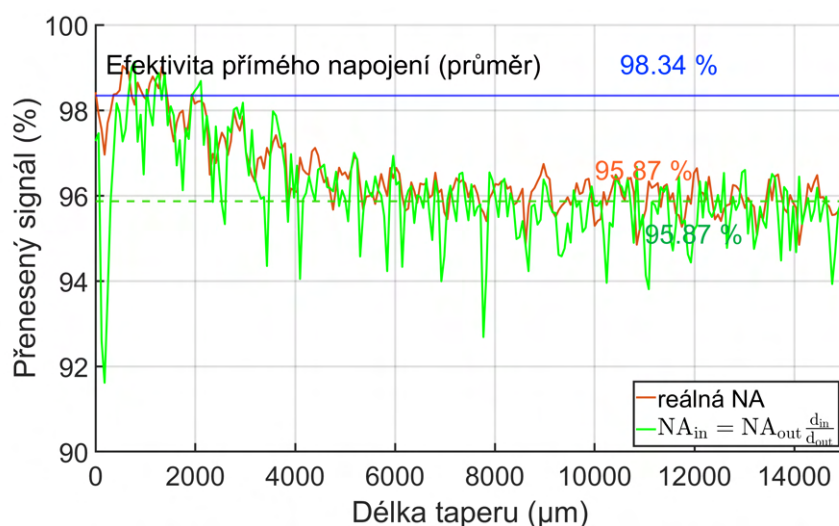


(b)

Obrázek 3.9: Přenesený výkon pro a) vlákno SMF-28 s průměrem jádra 8,2 μm b) s FG050LGA s průměrem jádra 50 μm s reálnými NA a NA splňující podmínku dle vztahu 3.3.



(a)



(b)

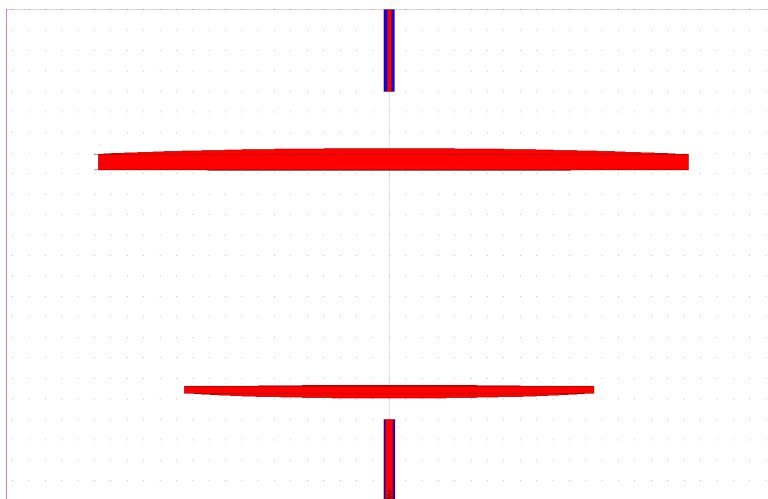
Obrázek 3.10: Přenesený výkon pro a) vlákno OM1 s průměrem jádra $62,5 \mu\text{m}$
 b) vlákno FG105LCA s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$ s reálnými NA a NA splňující podmínku dle vztahu 3.3.

3.2 Vazba pomocí čoček

V kapitole 2.2, byl představen návrh čočkového klecového systému, pro vazbu optické energie z vlákna FG105LCA do vlákna FG050LGA. Ze zjištěných parametrů na stránkách výrobce a z příložených dokumentů byla tato sestava taktéž v prostředí BeamPROP namodelována. Využita byla data jak popisující geometrické rozměry čoček tak jejich optické parametry. Aby bylo možné provést dostatečné množství simulací v přijatelném čase, byl celý návrh

simulován pouze ve 2D rovině. Množství simulací bylo takové abych získal dostatečnou představu o navrženém systému a zároveň abych získal data s odpovídající přesností.

Stejně jako v případě vazby pomocí optického vlákna byla i v tomto případě uvažována vlnová délka 980 nm. Pro vstupní svazek byl nejprve nastaven Gaussovský průběh svazku a později také vícevidový svazek „MultiMode“. Zvoleným typem monitoru byl „Partial Power“. Pro přesnější modelování situace bylo mezi zdrojové pole a soustavu čoček vřazeno vlákno proporcčně odpovídající vláknu FG105LCA a za soustavu čoček byl zařazen úsek představující vlákno s rozměry odpovídajícími vláknu FG050LGA. Aby byla snížena časová náročnost výpočtu simulací, byly čočky s vlákny modelovány společně v poměru 1:100. Jelikož BeamPROP neumožňuje modelování asférických čoček přímo. Pokusil jsem se vytvořit model potřebných čoček A110TM a C330TDM na základě optických a geometrických parametrů udávaných v technických dokumentacích výrobce. Model vytvořený v prostředí BeamPROP je uveden na obrázku 3.11. Nákres vytvořený v prostředí BeamPROP je z důvodů velkých proporciónálních rozdílů struktury v osách x a y obzaven v poměru 20:1. Na obrázku 3.11 jsou modře vyznačeny pláště vstupního a navazujícího vlákna.

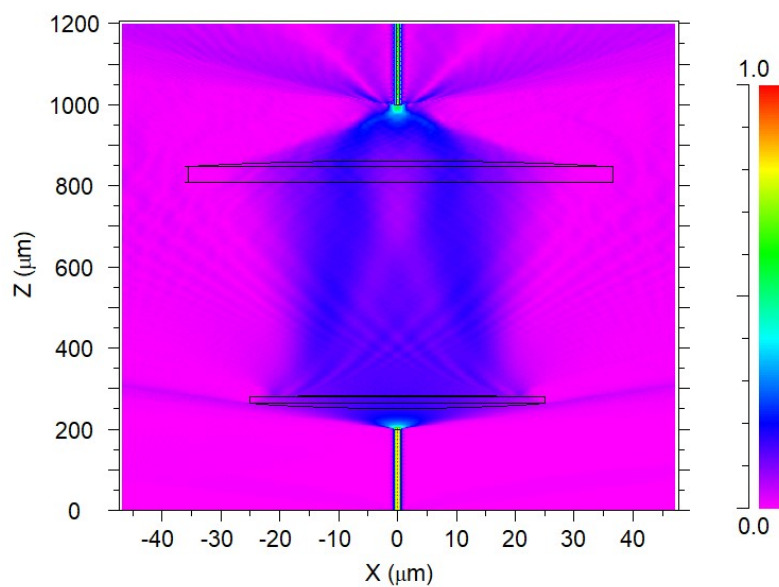


Obrázek 3.11: Model soustavy čoček pro vazbu výkonového optického záření v prostředí BeamPROP.

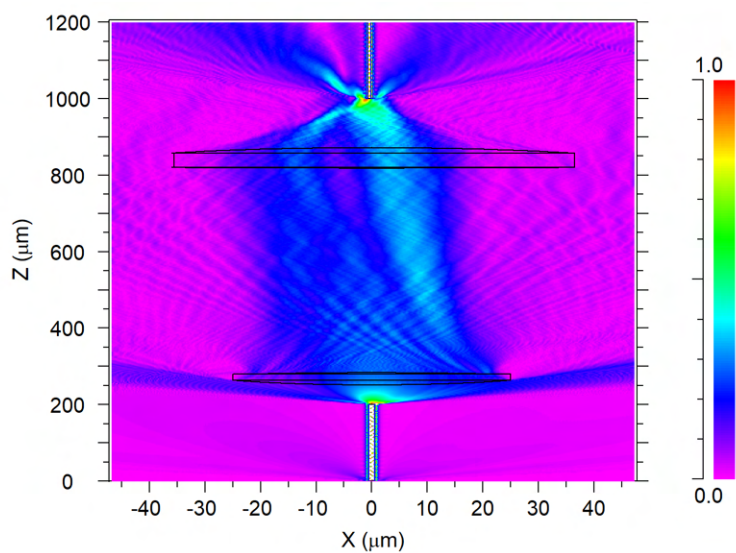
Jelikož je paprsek vyvázaný z vlákna šířen volným prostorem, musel být v simulacích nastaven index lomu pozadí na hodnotu 1 a vstupnímu a výstupnímu vláknu byl namodelován také plášť vlákna. z grafu na obrázku 3.12 je patrné, že modelovaná čočka C330TMD rozbíhavý svazek vystupující z vlákna zkolimuje a druhá modelovaná čočka A110TM jej následně zaostří na čelo navazujícího vlákna.

Po vytvoření modelu soustavy čoček jsem se pokusil nalézt optimální zarovnání čoček. Prvotní rozmístění jsem volil dle hodnot získaných při návrhu modelu v kapitole 2.2. Ukázalo se však, že tyto hodnoty nejsou dle výstupů simulací vhodné. Domnívám se, že tato skutečnost je způsobená nedokonalostí modelů vytvořených čoček a jejich odlišných ohniskových vzdáleností.

v rámci simulací jsem se pokusil najít optimální řešení pro modely mých čoček. Pomocí simulací byl zjišťován výstupní výkon při vzájemném posuvu čoček v ose simulované sestavy. Jako nejlepší se jeví řešení při umístění čoček modelovaných v simulačním prostředí do vzdálenosti 6 mm od konce vstupního vlákna v případě kolimační čočky a 16 mm od navazujícího vlákna v případě a zaostřovací čočky.



(a)



(b)

Obrázek 3.12: Výkon optického záření šířeného navrženou soustavou čoček, a) s Gaussovským svazkem b) vícevidovým svazkem.

Kapitola 4

Použité měřicí metody a měřicí přístroje

Takto kapitola je tvořena dvěma částmi. První část se zabývá popisem a technickými parametry přístrojů používaných v praktické části této diplomové práce. Druhá část pak popisuje metody měření, které byly použité v praktické části, za kterým následuje popis postupu při výrobě vzorků s přímým napojením pomocí svaru a vzorků, které využívají taperových vláknových přechodů.

4.1 Použité přístrojové vybavení

Optické zdroje firmy SAFIBRA, s.r.o.

Nejčastěji byly v rámci této práce využívány lasery od firmy SAFIBRA, s.r.o. Využívané zdroje optického záření jsou součástí řídicích modulů OFLS – Optical Fiber Light Source. Řídicí modul zahrnuje napájecí zdroj a stabilizační obvody pro laserové a SLED diody. Výstupní výkon je možné ovládat pomocí tří tlačítek s přednastaveným výkonem P_0 (100 % výkonu), P_1 (50 % výkonu), P_2 (10 % výkonu). Výkon je možné měnit také pomocí počítače vybaveného příslušným programem, tato možnost však v rámci této diplomové práce nebyla využita. Zařízení také umožňuje modulovat výstupní záření laseru interním nebo externím zdrojem. Zdroje s vyššími výstupními výkony jsou pro bezpečnost vybaveny zapínacím tlačítkem na klíč. Všechny použité zdroje SLED a laser s vlnovou délkou 808 nm byly osazeny konektorem FC/APC a bylo pro jejich použití nutné použít hybridním propojovacím kabelem (FC/APC-FC/PC) s vláknem FG105LCA. Lasery s vlnovou délkou 650, 850, 976 a 1550 nm byly osazeny FC/PC konektorem.

Optické zdroje OPTOKON, a.s.

Pro měření byly využity lasery z přístrojů firmy OPTOKON, a.s. určených pro měření a diagnostiku optických sítí. V rámci měření byly pouze využity laserové zdroje integrované v těchto zařízeních. Zařízení OFT-840 je vybaveno laserem pracujícím na vlnové délce 1310 nm. Výkon naměřený výstupní výkon při použití referenčního vlákna FG105LCA osazeného konektory FC/PC byl 1,86 mW. Zařízení LS-800 je vybaveno dvěma lasery, které pracují na

vlnových délkách 1490 a 1550 nm naměřený výkon na výstupu připojeného referenčního vlákna byl pro vlnovou délku 1490 nm 2,03 mW resp. pro vlnovou délku 1550 nm 0,85 mW. Zařízení LS-800 umožňuje přepínat výstup mezi zabudovanými lasery a není třeba fyzické přepojování vlákna. Ze spektra uvedeném na obrázku B.7 v příloze B.2 je zřejmé, že u přístroje LS-800 jsou pro každou vlnovou délku použity odlišné typy laserů. Pro laser s vlnovou délkou 1550 nm je pravděpodobně použit Fabry-Perrotův laser. Pro vlnovou délku 1490 nm je použit DFB (Distributed Feed Back) nebo DBR (Distributed Bragg Reflector) laser.

■ Ostatní optické zdroje

Pro měření spektrální charakteristiky byl využíván širokospektrální zdroj SLS201L/M. Jedná se o wolframo-halogenový stabilizovaný zdroj, konstruovaný pro navazování optického výkonu do optického vlákna. Zdroj vyzařuje v rozmezí vlnových délek 360-2600 nm o výkonu 10 mW. Tvar spektra odpovídá záření absolutně černého tělesa. Výstup přístroje přítomného v laboratoři je osazen konektorem FC/PC.

V experimentální části byly také proměřeny laser s maximálním výkonem 10 W s při vlnové délce 976 nm a Nd:YVO₄ laser. Laser Nd:YVO₄ byl napájen pomocí zdroje CASIX LDC-1500, kterým bylo možné regulovat budící proud laserové diody a tím také natavit výstupní optický výkon laseru. Centrální vlnová délka použitého Nd:YVO₄ laseru je 532 a 1064 nm.

Zkoumané vzorky nebyly připojované přímo ke zdroji optického záření, ale na předřadné vlákno. Pokud u daného laseru předřadné vlákno chybělo, bylo na vstup laseru připojeno nejprve referenční vlákno FG105LCA, za které pak pomocí konektorové spojky byl připojen měřený vzorek. Účelem tohoto opatření bylo snížit opotřebení konektoru zdroje. Ze stejného důvodu bylo za měřený vzorek druhé referenční vlákno, které bylo posléze připojeno k měřicímu detektoru.

■ Měřící přístroje

■ Detektory a řídicí konzole pro měření optického výkonu

Pro měření optických výkonů na výstupu jednotlivých vzorků byly použity detektory od společnosti Thorlabs. Volba použitého detektoru závisela především na výstupním optickém výkonu příslušného laseru a jeho vlnové délce. Detektory S151C, S155C jsou konstruovány na maximální vstupní výkon 20 mW (~13 dBm). Pro výkony vyšší než 20 mW bylo třeba použít detektor S302C nebo S415C. Přehled vybraných parametrů použitých detektorů uvádí tabulka 4.1. Detektory jsou připojovány k řídicí konzoli pomocí konektoru D-Sub 9.

Detektory jsem připojoval k řídicí konzoli PM100D ovládané pomocí tlačítek nebo PM200 ovládané pomocí dotykové obrazovky. Na konzolích bylo možné

zvolit automatický výkonový rozsah. Pro správné vyhodnocení však bylo nutné nastavit aktuálně měřenou vlnovou délku.

Tabulka 4.1: Vybrané parametry použitých měřících detektorů Thorlabs.

Detektor	Rozsah vln. délek (nm)	Maximální výkon (mW)	Nejistota měření	Optický výkonový rozsah
S151C	400-1100	20	±5 %@ 400-439 nm ±3%@ 444-980 nm ±7%@ 981-1100 nm	1 nW-20 mW
S155C	800-1700	20	±5 %	1 nW-20 mW
S302C	190-25 000	2 000	±3 %@ 1064 nm ±5 %@ 190-25 000 nm	100 μm-2 W
S415C	190 - 20 000	10 000	±3 %@ 1064 nm ±5 %@ 270-17 000 nm	2 mW-10 W

■ Spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C

Spektrální analyzátor byl použit pro měření spekter mnou vyrobených i profesionálních vzorků, se kterými jsem své vzorky porovnával. Vstup analyzátoru je kalibrován na vlákno standardu OM1 a proto byly všechny měřené vzorky připojovány k analyzátoru pomocí tohoto vlákna. Tím se také snižuje opotřebení konektoru na vstupu analyzátoru.

Analyzátor je před zahájením měření třeba zkalibrovat. Před zahájením procesu kalibrování je měřicí vstup propojen s výstupem vnitřního zdroje analyzátoru. Pokud s přístrojem nebylo manipulováno a je jistota, že neutrpěl žádný náraz, je možné provést pouze kalibraci vlnových délek. V mých měřeních jsem vždy prováděl obě kalibrace (pro zarovnání optického svazku i vlnových délek). Po dokončení kalibrace pro zarovnání optického svazku, je automaticky spuštěna kalibrace vlnových délek. Před zahájením kalibračních procedur je doporučeno vyčkat hodinu na dostatečné zahřátí přístroje, v opačném případě může dojít ke zvýšení chyby měření.

Před vlastním měřením je možné nastavit rozsah měřených vlnových délek a krok se kterým je spektrální charakteristika měřena. Naměřená data se ukládají do zvoleného kanálu „A“ nebo „B“, kanál „C“ pak slouží k ukládání výsledků zvolené početní operace mezi hodnotami kanálu „A“ a „B“. V mém případě jsem od dat v kanálu „A“ (spektrum měřeného vzorku) odečetl data z kanálu „B“ (spektrum referenčního vlákna FG105LCA), výsledné hodnoty v kanálu „C“ tak odpovídají spektrální charakteristice daného vzorku. Citlivost měření byla nastavena na „HIGH2“ a nastavený krok měření spektrální charakteristiky byl 1 nm. Vzorky vláken byly obvykle měřeny v celém možném spektrálním rozsahu (okrajové oblasti silně ovlivněné šumem byly vynechány při vyhodnocování). Rozsah měřených vlnových délek při měření spektrálních charakteristik optických zdrojů byly voleny dle předpokládaného výkonového maxima zdroje a charakteru spektrální křivky.

Vybrané parametry spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Parametry použitého spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C

Měřicí rozsah vlnových délek (nm)	600 - 1700
Spektrální rozlišení (nm)	0,02 nm
Dynamický rozsah (dB)	78
Max. vst. měřený výkon (dBm)	20 dBm

■ Čtyřkanálový testovací systém pro optická vlákna OFT-4212 OPTOKON, a.s.

Vybrané vzorky, byly měřeny pomocí čtyřkanálového testovacího systému OFT-4212 od společnosti OPTOKON, a.s. Přístroj OFT-4212 se skládá z laserové části a měřící části. Laserová část obsahuje tři lasery vyzařující na vlnové délce 850, 980 a 1300 nm. Výstup lze přepínat mezi jednotlivými lasery. V mém případě byla k výstupu laserové části připojena rozbočnice OPTOKON, a.s. SFM5 - S85 / 13 - 01 x 04 25 - CM3 - PC - PC. Rozbočnice má jeden vstup připojený k výstupu laserů a čtyři výstupy. Nejprve byly tyto výstupy připojeny na jednotlivé kanály měřící části a byla nastavena referenční hodnota pro jednotlivé vlnové délky, poté byly mezi výstupy rozbočnice a měřící vstupy testovacího zařízení OFT-4212 zařazeny tři měřené vzorky. Čtvrtý výstup zůstal připojený přímo k měřicímu vstupu zařízení OFT-4212 a byl považován za referenční. Poté byla pomocí připojeného počítače nastavena perioda automatických odměrů. Výstupní výkon každého z laserů je dle specifikací výrobce -5 dBm ($\sim 316 \mu\text{W}$). Měřící část měří s přesností 0,01 dB a nejistota měření je $\pm 5 \%$ z naměřené hodnoty. Dynamický rozsah je -65 až 10 dBm. Zařízení je osazeno FC/PC konektory.

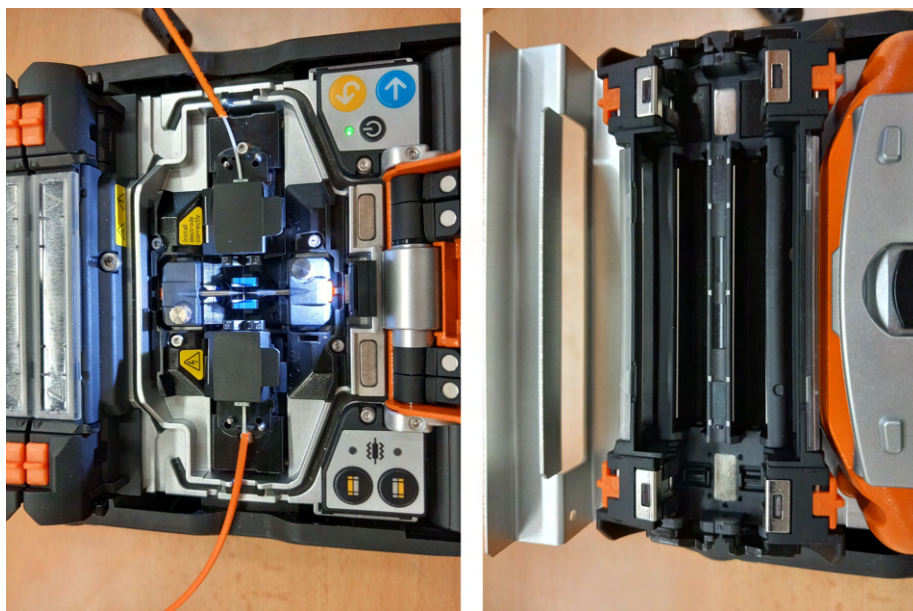
■ Svářecí stanice SUMITOMO Type 72C

Sváry vláken byly prováděny pomocí svářecí stanice SUMITOMO Type 72C. Svářecí stanice jejíž fotografie je uvedena na obrázku 4.1, je určena pro svařování vláken v křemičitého skla SiO_2 (vlákna SMF, MMF, DSF, NZDSF apod.). Přibližně 1 cm od svařovacích elektrod jsou umístěny dvě magnetické svorky pro upevnění vlákna. Požadovaná pozice čel vláken je udržována pomocí centrovacích V-drážek. Svařovat lze vlákna s průměrem pláště 80-150 μm a ochrannou izolací o průměru 100-1000 μm . Svařování je prováděno pomocí obloukového výboje. Svařovací prostor je uveden na obrázku 4.2a. Ve vnitřní paměti může být uloženo až 300 svářecích programů, z nichž 226 může být uživatelem dle potřeby upravováno. Pomocí svářecíky je možné svařovat i vlákna s rozdílnými průměry jader. Svářecíka je vybavena dvěma CCD kamerami, které slouží k automatickému zarovnání jader svařovaných vláken v osy X a v ose Y. Obraz z CCD kamer je zobrazen na dotykovém pětipalcovém displeji. Mezi další vybavení patří elektrická pícka pro zatavení

chráničky svaru. Fotografie pece na zatavení ochranné bužírky se zpevňovacím drátem je na obrázku 4.2b.



Obrázek 4.1: Celkový pohled na svářecí stanici SUMITOMO Type 72C.



a)

b)

Obrázek 4.2: Detailní fotografie a) svářecího prostoru, b) pece pro zatavení ochranné bužírky.

■ Stanice pro výrobu taperů Vytran™ GPX-3000

Při řešení diplomové práce jsem měl k dispozici vzorky vláken s taperovými přechody vyrobené zařízením Vytran™ GPX-3000.

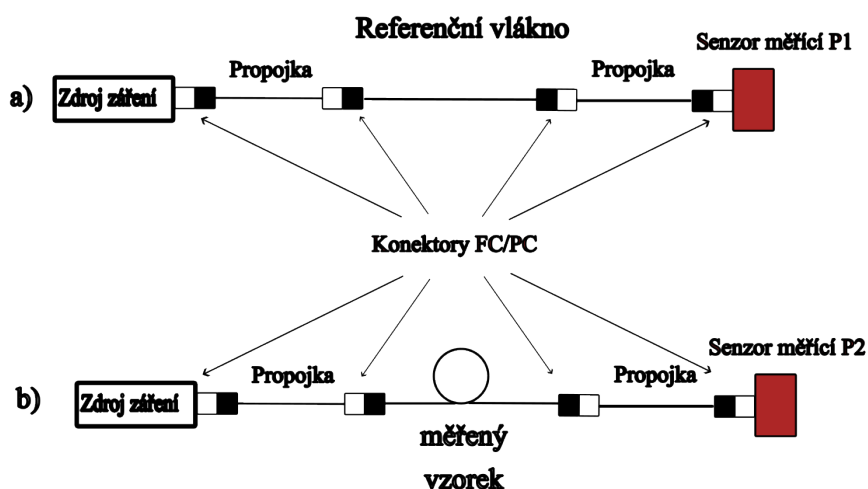
Přístroj Vytran™ GPX-3000 je zařízení pro experimentální výrobu optických vláknových součástek. Mimo svařování vláken umožňuje také výrobu vláknových taperů, které byly použity pro výrobu taperových přechodů mezi vlákny s odlišnými průměry jader. Přístroj Vytran™ GPX-3000 je schopen pracovat s vlákny o průměru jádra 40 μm až 2 mm. Maximální délka taperu, kterou lze vyrobit je 150 mm, minimální pak ~ 2 mm. Požadovaný ohřev vlákna je realizován pomocí grafitové odporové pece. Grafitová pec zajišťuje stabilní vysokou teplotu až 1 800°C. Do grafitové pece jsou navíc přivedeny plynové hadičky pro přívod argonu vytvářejícího ochrannou atmosféru během zahřívání vlákna. Zařízení je vybaveno dvěma posuvnými jezdcí ve kterých je při výrobě taperu uchyceno taperované vlákno. Pohyb jezdců zajišťují přesné krokové motory, Zařízení je ovládáno pomocí připojeného počítače. Kvalitně zaostřené zobrazení vláken je umožněno důmyslnou soustavou zrcátek, osvětlovacích LED a CCD kamery s vysokým rozlišením. Tato zobrazovací technologie se nazývá „True Core Imaging“. Obraz z kamery je přenášen do počítače, kde je pomocí příslušného vybavení možné měřit rozměry snímáných vláken. Pomocí připojeného počítače je možné zařízení ovládat, vytvářet a optimalizovat výrobní proces optických vláknových součástek.

■ 4.2 Metody měření

Nejčastěji využívanou metodou při měření vzorků byla metoda vložných ztrát. Výhodou metody je její nedestruktivnost, která je pro měření vzorků vyžadována. Je však oproti metodě dvou délek méně přesná. Metoda spočívá v zapojení úseku vlákna se známým útlumem (referenčního vlákna) mezi zdroj optického záření a detektor pro měření výkonu. Po zaznamenání naměřeného výkonu vyjmeme referenční úsek vlákna a vložíme vzorek jehož útlum chceme změřit. Výsledný útlum je možné určit pomocí vztahu 4.1.

$$u(\lambda) = \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.1)$$

kde P_1 je výkon naměřený při zapojeném referenčním vlákně, P_2 je výkon naměřený při zapojení zkoumaného vzorku a $u(\lambda)$ je útlum měřeného vzorku při vlnové délce použitého optického zdroje. Schématický náčrt postupu při měření metodou vložných ztrát je uveden na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Schématický náčrt postupu při měření útlumu metodou vložných ztrát a) Měření s úsekem referenčního vlákna (zjišťování hodnoty P_1), b) Měření s úsekem měřeného vlákna (zjišťování hodnoty P_2).

4.3 Realizace návrhů

Vzorky, u kterých byl spoj tvořen svařem, byly vyrobeny (svažovány) pomocí svařecí stanice SUMITOMO Type 72C. Popis přístroje je uveden v podkapitole 4.1. Vstupní a výstupní vlákna byly osazeny konektory FC/PC. Pro tento účel jsem využil propojovací optické kabely osazené těmito konektory rozstříhl přibližně v jejich polovině a získané úseky vláken s konektorem jsem použil jako vstupní nebo výstupní úsek vyráběného vzorku.

Na jeden ze svažovaných úseků je nutné před vlastním procesem navléct ochrannou bužíрку se zpevňovacím drátem. Pozdější navlékání by mohlo způsobit poškození čela napojovaného vlákna nebo jeho znečištění. Z konců spojovaných vláken bylo nutné nejprve odstranit vnější a následně i základní ochrannou vrstvu izolace. Součástí některých optických kabelů byl pevnostní prvek tvořený kevlarovým vláknem. V takovém případě bylo nutné toto vlákno odstříhnout. Střih jsem provedl v místě od kterého byla odstraněna vnější izolace. K odstranění izolace jsem použil k tomuto účelu určené stripovací kleště. Fotografie těchto kleští je uvedena obrázkem 4.4a. Kleště mají několik postupně se zmenšujících otvorů pro odstraňování jednotlivých vrstev ochranných izolací.

Po mechanickém odstranění ochranných izolací bylo ještě nutné vlákno očistit pomocí bezprašného ubrousku napuštěného v izopropylalkoholu. Tento krok zajišťuje odstranění případných drobných zbytků izolace a jiných nečistot.

Následně je potřeba vlákno zalomit. Pro provedení svaru s nízkým útlumem je důležité, aby bylo vlákno zalomeno kolmo ke své ose. Pro tento účel je

využívaná lamačka vlákna. Lamačka, která byla používána během výroby vzorků je na obrázku 4.4b. V horní polovině obrázku se nachází kontejner na zbytky zalomených vláken do kterého je odlomené vlákno pomocí posuvného kolečka po zalomení přesunuto. Drobné úlomky vláken mohou být nebezpečné a proto je s nimi nakládáno jako s nebezpečným odpadem. Zhruba v polovině obrázku 4.4b se nachází zalamovací kolečko. Vlastní zalomení vlákna je pak provedeno stlačením. Ve spodní části obrázku 4.4b se nachází V-drážky a svorka pro uložení a připevnění vlákna. V pravé části obrázku je vidět vrchní kryt, kterým je vlákno při zalamování přikryto. Kryt pomocí styčných plošek fixuje pozici vlákna v okolí zalamovacího kolečka a zároveň slouží jako ochrana před vystřelením úlomku vlákna.

Během procesu zalamování je zalamovací kolečko nejprve nutné přesunout do natažené polohy jako je zachyceno na obrázku 4.4b. Poté je vloženo vlákno do V-drážky s odpovídající velikostí a následně zajištěno magnetickou svorkou. Po zaklopení vrchního krytu dojde zatlačením na stříbrnou páčku (na obrázku 4.4b zcela vlevo) k zalomení vlákna. Odlomenou část vlákna přesune posuvné kolečko automaticky do odpadního kontejneru.



a)

b)

Obrázek 4.4: Fotografie použitých nástrojů pro přípravu vlákna a) kleště pro odstranění ochranné bužírky, b) lamačka vlákna.

Takto zalomená vlákna se vloží do vodících V-drážek svářecí stanice a zajistí se proti posunutí magnetickými svorkami. Po zaklopení vrchního krytu se aktivují CCD kamery a svářecí stanice provede kontrolu vláken a jejich osové vyrovnaní jak v ose X tak v ose Y. V případě, že je odchylka od kolmého lomu příliš velká, popřípadě je čelo vlákna jinak mechanicky poškozeno svářecí stanice doporučí provedení opětovného zalomení vlákna. Pokud

je zalomení vlákna vyhodnoceno jako dostatečné, provede svářecí stanice podle nastaveného svářecího programu krátký očištný oblouk, kterým jsou odstraněny drobné nečistoty a poté zahájí vlastní svařovací proces při kterém jsou svařovacím obloukem obě vlákna spojena. Popisovaná svářecí část je zachycena na obrázku 4.2a.

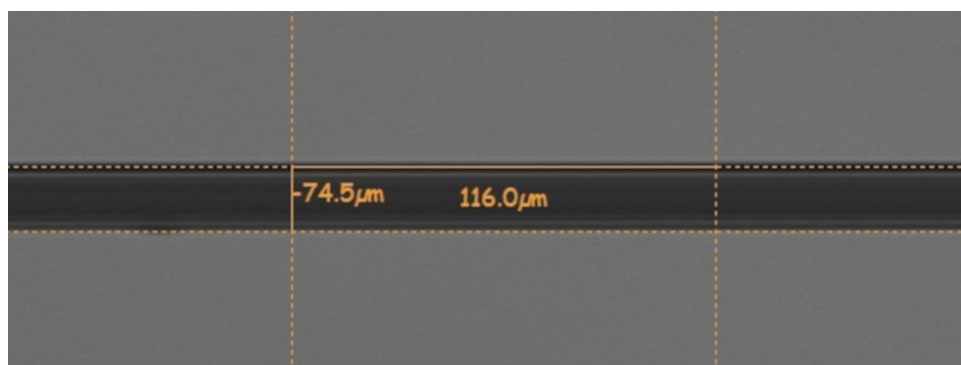
Po dokončení svářecího procesu je bužírka se zpevňovacím drátem nasunuta na místo svaru a vložena do pícky v horní zadní části svařovací stanice (obrázek 4.2b v podkapitole 4.1.) v pícce se bužírka smrští a chrání tak svar před vlhkostí. Zpevňovací drát zvyšuje tahovou odolnost svaru. Bez ochranných vrstev je vlákno a svar podstatně zranitelnější, než zbylé úseky vlákna, navíc se nechráněný svar stává vlivem vzdušné vlhkosti časem křehčí.

■ Výroba vzorků s taperovými přechody na zařízení Vytran™

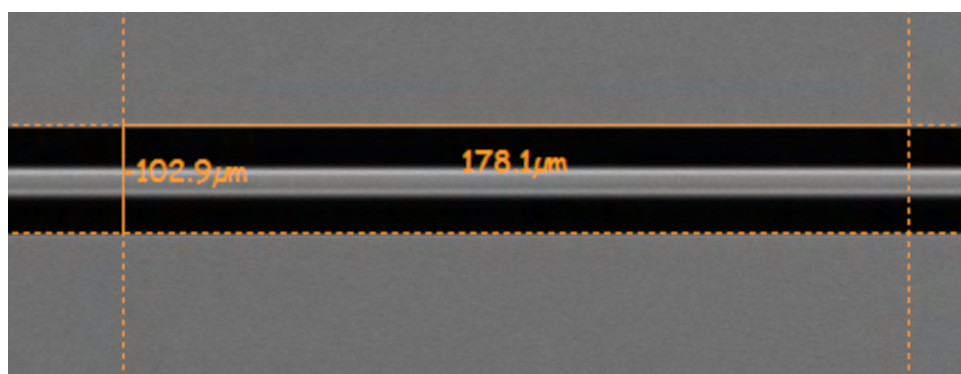
Celkem byly realizovány tři vzorky využívající taperových přechodů. Konkrétně se jedná o vzorek 12 (FG105LCA/taper(105 → 62,5)/OM1/taper(62,5 → 50 μm)/OM2/SMF 9 μm), 15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5)/OM2) a 16 (FG105LCA/taper(105 → 50)/OM2). Seznam vzorků využívajících vláknových svarů je uveden v tabulce 5.4 v kapitole 5.1. Vzorky 12, 15 a 16 mají přechod mezi FG105LCA a OM1 vláknem tvořen taperovým přechodem vytvořeným z vlákna FG105LCA. Vzorek 12 využívá taperový přechod i mezi vláknem OM1 a OM2, kdy bylo taperováno vlákno OM1 s průměrem 62,5/125 μm (jádro/plášť) na průměry 50/100 μm (jádro/plášť). Vlákno SMF 9 μm a vlákno OM2 jsou na sebe navařeny na přímo.

Taperový přechod mezi vlákny byl vždy tvořen s vlákna s větším průměrem jádra. Například u přechodu mezi FG105LCA a OM1 vláknem bylo taperováno vlákno FG105LCA. Nejprve bylo potřeba vlákno v potřebné délce zbavit ochranné a základní ochrany. Poté byl úsek s odstraněnou izolací očištěn pomocí bezprašného ubrousku napuštěného izopropylalkoholem. Po důkladném vyčištění bylo vlákno vloženo do pohyblivých úchytů.

Poté byl spuštěn program s definovanými parametry pro výrobu taperu. Vyjízďející uhlíková odporová pec ve tvaru písmene „U“ obklopila část vlákna s odstraněnou izolací a začala jej zahřívat. Současně byl pomocí automatického mikroventilu otevřen přívod argonu do pece. Na zahřívání vlákno současně působil definovaný tah pohyblivých úchytů. Při nastavování parametrů bylo třeba optimalizovat nastavení parametrů tak, aby nedošlo k přetržení vlákna nebo k jeho roztavení. Změknutím materiálu vlákna a jeho tažením dojde ke zúžení průměru vlákna, přičemž poměr průměrů jádra a pláště zůstává stejný. Taperované vlákno s průměrem jádra 62,5 μm by tak měl být 74,4 μm, což přibližně odpovídá dosaženému výsledku (rozdíl pouze 0,1 μm). Programově změřený úsek pasu vlákna je na obrázku 4.5(a).



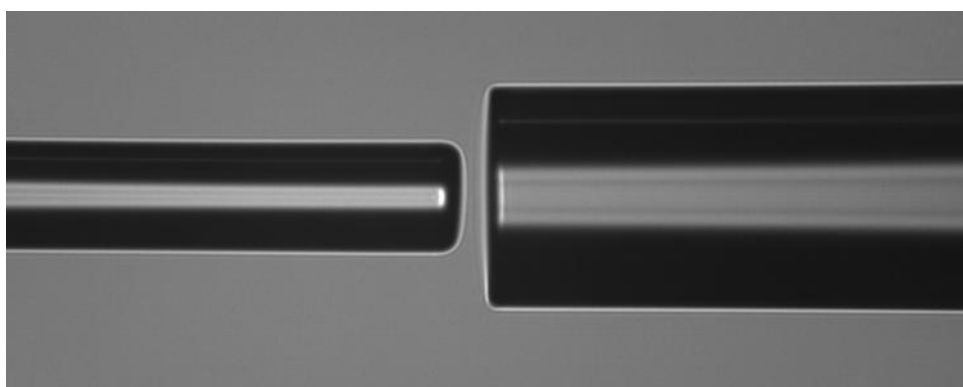
(a)



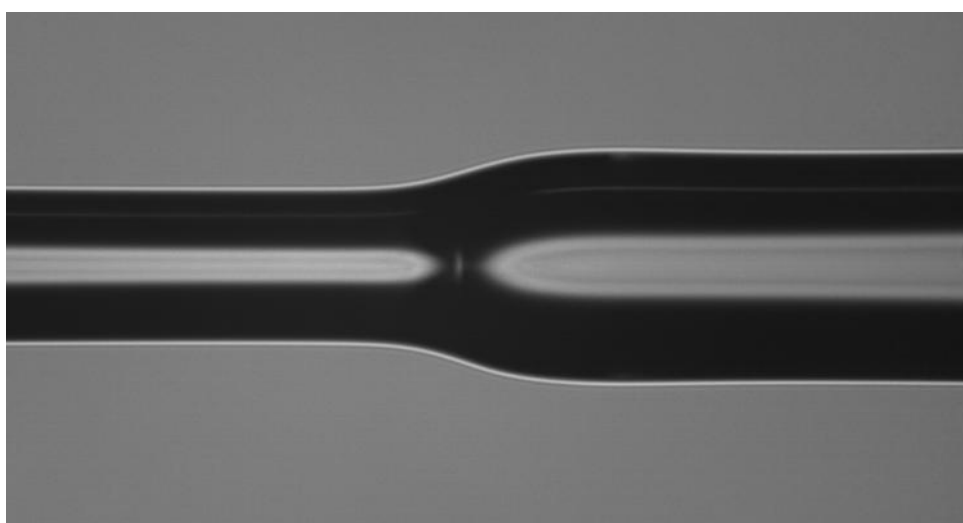
(b)

Obrázek 4.5: Fotografie z kamery mikroskopu s pasy taperů o požadovaném průměru a) vlákno FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť) taperované na průměr 62,5/74,5 μm (jádro/plášť), b) vlákno OM1 s průměrem 62,5/125 μm (jádro/plášť) taperované na průměr 50/100 μm (jádro/plášť). Číslo na snímku vpravo značí průměr pláště v měřeném místě. Druhé číslo udává vzdálenost od předchozího měřeného bodu při hledání pasu taperu. Fotografie byla pořízená při výrobě TAPERU ing. T. Martanem Ph.D.

Po dokončení taperového přechodu je nutné najít tzv. pás taperu tj. nejúžší oblast s požadovaným průměrem. Posun snímané části se provádí pomocí dR – dual Right funkce. Jeden krok dR odpovídá přibližně třem milimetrům. V tomto pase je pak taper přestřižen. Ustřižený konec taperu tzv. taperová špička se před navařením na příslušné vlákno musí opětovně očistit izopropylalkoholem a zalomit. Podrobnější popis zalomení vlákna je popsán výše. Na zalomená vlákna byla poté navařena požadovaná navazující vlákna. Během vzniku této práce se bohužel nepodařilo vyrobit taperový přechod mezi vlákny OM2 a SMF vlákny. Nejmenší průměr vlákna (průměr pláště), se kterým dokáže stanice VytranTM pracovat je 40 μm, což je přibližně 2 více, než by byl průměr pláště taperového pasu s průměrem jádra 9 μm. Tapery s menšími průměry pasu jsou bez ochranných izolací navíc velmi křehké a může dojít k jejich poškození již během výroby.



(a)



(b)

Obrázek 4.6: Navaření vlákna standardu OM2 na špičku taperu s průměrem 62,5/74,5 jádro/plášť. a) Špička taperu (125/105 - 59/50 μm) na OM2 (125/50 μm) před svárem (osa y), b) Svar taperu (125/105 - 59/50 μm) na OM2 (osa y). Fotografie byla pořízená při výrobě TAPERU ing. T. Martanem Ph.D.

Kapitola 5

Naměřené výsledky

Praktická část diplomové práce je zaměřena na měření vlastností experimentálně vytvořených vzorků, pro navazování výkonového optického záření pro systémy Power over Fiber. Navazována vlákna mají rozdílné průměry jader a odlišná vidová pole (MFD). Cílem je vytvořit, měřením ověřit a určit takový typ optické vazby, který bude vykazovat nejnižší výkonové ztráty. Vytvořené vzorky, které vykazují nejvyšší účinnost vazby jsou porovnány s profesionálně vyrobeným vazebním členem MFA MH GoPower (Adaptérem pro úpravu průměru vidového pole). V rámci měření jsou také měřeny vlastnosti vybraných rozbočnic a otočného konektoru.

■ Ověření charakteristik použitých zdrojů

Před zahájením měření vytvořených vzorků byly nejprve proměřeny vlastnosti použitých optických zdrojů. Byl také porovnán naměřený referenční výkon mezi jednotlivými detektory používanými pro měření optického výkonu v této práci.

Při měření optických zdrojů byly použity především lasery od společnosti SAFIBRA, s.r.o. a OPTOKON, a.s. Při ověřování vlastností optických zdrojů byl využit také Nd:YVO₄ laser s napájecím zdrojem CASIX. Laser Nd:YVO₄ však byl proměřen pouze z hlediska výstupních výkonů a dále v praktické části nebyl uvažován, neboť tento laser vyzařuje na vlnové délce 532 a 1064 nm a pro aplikaci PoF je nevhodný. Změřené hodnoty s příslušnými komentářem jsou uvedeny v příloze B.1. Spektrální charakteristiky dostupných optických zdrojů jsou uvedeny v příloze B.2.

V tabulce 5.1 jsou shrnuty naměřené hodnoty získané ze spektrálního analyzátoru YOKOGAVA. Tabulka pro každý měřený laser uvádí vlnovou délku uvedenou na štítku přístroje a změřenou vlnovou délku, která byla spektrálním analyzátozem zjištěna. Tabulka také uvádí hodnoty maximální hodnoty výstupního optického výkonu P_{\max} pro každý měřený laser. Dále je zde uvedena šířka vyzařované spektrální čáry (FWHM – Full Width Half Maximum), která byla určena jako pokles výkonu z maximální úrovně na úroveň $\frac{1}{2}P_{\max}$. Šířka spektrální čáry byla vypočítána z dat naměřených pomocí spektrálního analyzátoru. Data byla ukládána ve formátu .CSV.

Tabulka 5.1: Tabulka naměřených hodnot optických zdrojů. FWHM udává šířku vyzařované spektrální čáry.

Název zařízení	Výrobce uvedená λ (nm)	Naměřená λ (nm)	P_{\max} (dBm)	FWHM (nm)
SLED				
OFLS-B-31-10-100-C	1298	1302	-22,1	31,4
OFLS-B-48-15-40-C	1474	1476	-17,5	39,6
OFLS-B-55-10-100-C	1565	1588	-14,5	82,1
Lasery				
OFLS-L-658-3	650	657	-0,2	1,5
OFLS-6-808-250	808	805	5,67	1,7
OFLS-L-850-10	850	844	-5,3	1,7
OFLS-6K PLM	976	976	9,9	1,4
OFT – 840	1310	1315	0,5	1,3
OL-800	1490	1490	3,2	0,7
OL-800	1550	1538	-4,6	0,8
OFLS-L-1550-2	1550	1550	-14,3	0,6

■ Ověření měřených hodnot detektorů používanými pro měření optického výkonu

Měření detektorů přítomných v laboratoři si kladlo za cíl zjistit případné rozdíly v naměřených výsledcích. K dispozici jsem měl detektory S151C, S155C, S302C a S415C výrobce Thorlabs. Parametry a popis těchto detektorů je uveden v kapitole 4. Jako zdroj byly použity lasery zařízení OFT4212. Zařízení obsahuje lasery vyzařující na vlnových délkách 850, 980 a 1300 nm. Detektory byly připojeny na jeden z výstupu rozbočnice SFM5-S85/13-1x4Y. Rozbočnice, které byly k dispozici, neměly přesný dělicí poměr 1:4 a výstupní optický výkon každého výstupu se mírně lišil. Proto musel být pro srovnávací měření detektorů použit pouze jeden výstup z rozbočnice. Použitý výstup je vyznačen na obrázku 5.1. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 5.2 a 5.3.

**Obrázek 5.1:** Použitá rozbočnice s označením použitého výstupu. Na obrázku vlevo jsou 4 výstupy samostatně vpravo je vstup.

Tabulka 5.2: Výkony naměřené na detektorech připojených na měřící konzoly PM200-Thorlabs.

λ [nm]	Výkony na detektorech (μW)				
	S151C	S155C (2016-03-16)	S155C (2020-08-14)	S302C	S415C
850	280±20	280±30	230±40	290±10	7 100
980	200±5	201±3	190±5	220±10	6 100
1300	-	141	130	180	6 200
měřící rozsah (nm)	400-1100	800-1700	800-1700	190-25 000	190-20 000
Max. optický výkon (mW)	20	20	20	2 000	10 000

Tabulka 5.3: Výkony naměřené na detektorech připojených na měřící konzoly PM100D-Thorlabs.

λ [nm]	Výkony na detektorech (μW)				
	S151C	S155C (2016-03-16)	S155C (2020-08-14)	S302C	S415C
850	300±20	280±20	250±50	356±5	42·10 ⁶
980	200±3	201±3	190±5	283±10	46·10 ⁶
1300	-	141	131	223	44·10 ⁶
měřící rozsah (nm)	400-1100	800-1700	800-1700	190-25 000	190-20 000
Max. optický výkon (mW)	20	20	20	2 000	10 000

Jak z tabulky 5.2, tak 5.3 je patrné, že při měření pomocí detektoru S415C na samé spodní hranici jeho měřícího výkonového rozsahu získáme v porovnání s ostatními detektory značně odlišné výsledky. Při využití měřící konzole SM100D-Thorlabs navíc zobrazované hodnoty byly vyšší, než je maximální povolený měřící výkon. Domnívám se tedy, že starší řídicí konzole chybně interpretuje výstupy z detektoru. U měřící konzole SM200-Thorlabs předpokládám, že ke zkreslení dochází vlivem nízkých výkonů zdroje, které jsou pod deklarovanou rozlišovací schopností 2 mW - 10 W.

5.1 Spektrální charakteristiky

V kapitole 2.1 byl zvažován způsob přímého navaření vláken. V kapitole 3.1 byla tato konfigurace pomocí simulačního prostředí BeamProp odsimulována. V této podkapitole jsou uvedeny výsledky měření připravených vzorků. Cílem tohoto měření je porovnání naměřených hodnot s nasimulovanými výsledky.

Jako zdroj záření byl použit širokopásmový zdroj SLS201L/M. K měření útlumu pro spektrální rozsah 600-1700 nm byl použit spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C. Měření probíhalo s krokem 1 nm a s úrovní přesnosti „High2“. Přehled měřených vzorků s jejich popisem je uveden v tabulce 5.4.

Před samotným měřením byl pomocí propojky tvořené vícevidovým vláknem OM2, propojen kalibrační výstup analyzátoru se vstupem a poté byla provedena kalibrace přístroje. Kalibrace zahrnuje zarovnání optického svazku (Optical Adjustment) a zkalibrování vlnové délky (Wavelength Calibrator).

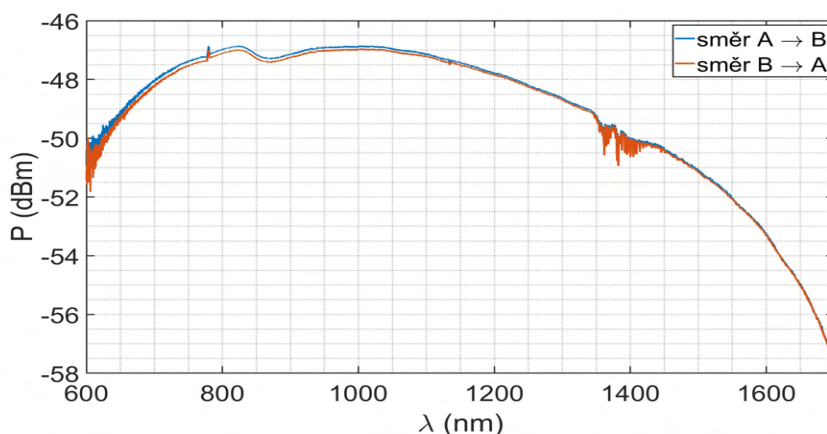
Tabulka 5.4: Přehled vzorků. (Lomítko v popisech znamená nerozebíratelné spojení pomocí svaru. U DCF vlákna je v závorce uveden průměr 1. pláště, před závorkou průměr jádra - vzorky S9, S10 a S11.)

Číslo vzorku	Označení vzorku	Průměry jáder (μm)
S1	FG105LCA/OM1/OM2	105/62,5/50
S2	FG105LCA/OM2	105/50
S3	FG105LCA/SMF 4 μm	105/4
S4	FG105LCA/SMF 4 μm	105/4
S5	FG105LCA/SMF 9 μm	105/9
S6	FG105LCA/OM1	105/62,5
S7	FG105LCA/OM1	105/62,5
S8	FG105LCA/OM2	105/50
S9	FG105LCA/DCF13/OM2	105/9(105)/50
S10	FG105LCA/DCF13/SMF 9 μm	105/9(105)/9
S11	FG105LCA/DCF13/OM1	105/9(105)/62,5
S12	FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm) /OM1/taper(62,5 \rightarrow 50 μm) / OM2/taper(50 \rightarrow 9 μm) /SMF 9 μm	105/taper/62,5/taper/50/9
S13	OM1/OM2	62,5/50
S14	OM2/SMF 9 μm	50/9
S15	FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm) /OM2	105/taper(na 62,5)/50
S16	FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm) /OM2	105/taper(na 50)/50

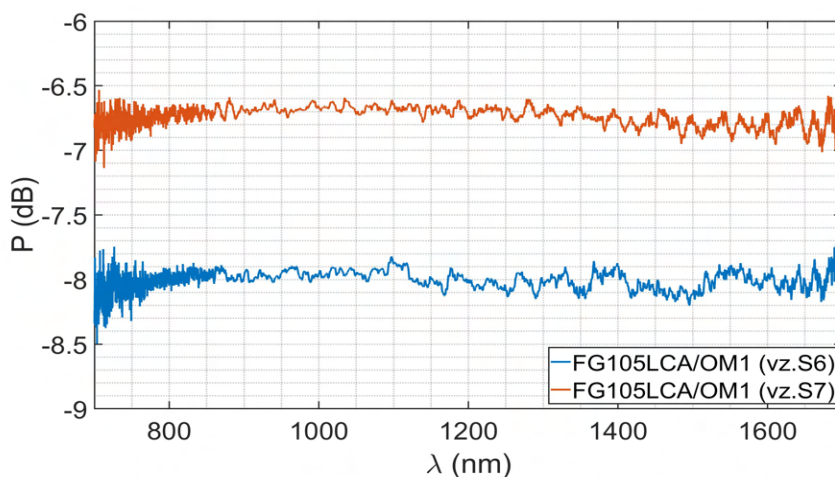
Po kalibraci bylo k širokospektrálnímu zdroji připojeno vlákno s průměrem jádra 105 μm a druhý konec vlákna byl připojen k analyzátoru. Referenční vlákno bylo proměřeno v celém rozsahu spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C (600 – 1700 nm) Do kanálu „A“ byl uložen výstupní průběh pro referenční 105 μm vlákno. Referenční vlákno bylo změřeno v obou směrech a výsledný průběh výstupního výkonu vlákna je pro oba směry uveden v grafu

na obrázku 5.2. Z obrázku 5.2 také vyplývá, že maximální výkon širokospektrálního zdroje SLS201L/M je v intervalu vlnových délek 750 – 1150 nm a to přibližně -47 – -47,5 dBm, což je přibližně 18-20 nW. Výkon je takto malý z důvodu technicky obtížného navázání ze širokospektrálního optického zdroje wolframovo-halogenového lampy. Křivky spekter na obrázku 5.2 se tvarově i výkonově liší jen minimálně a rozdíly mezi nimi lze přičíst vlivu konektorů referenčního vlákna.

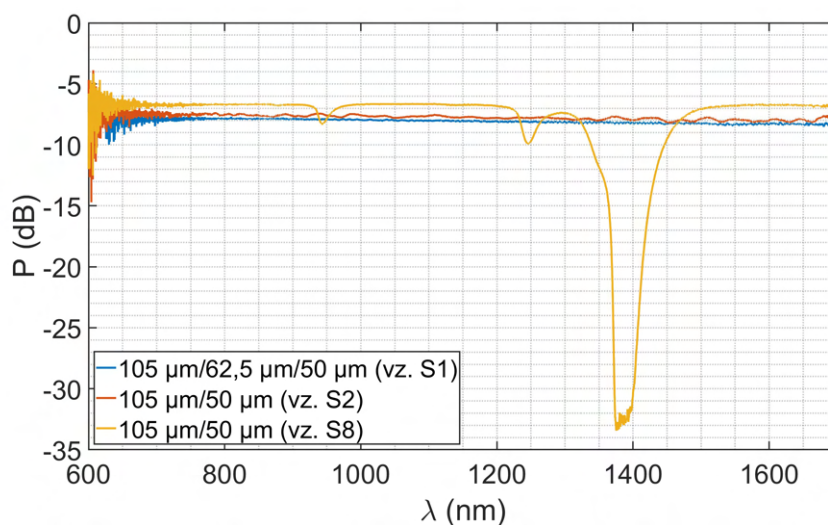
Kanálu „A“ byl po změření průběhu z referenčního vlákna zafixován a průběhy jednotlivých vzorků byly ukládány do kanálu „B“. Rozdíl průběhů v kanálech „A“ a „B“ byl ukládán do kanálu „C“. Hodnoty v kanálu „C“ představují rozdíl výkonových úrovní mezi referenčním vláknem a měřeným vzorkem v dB. Průběhy na obrázcích 5.3, 5.4, 5.5 jsou vykresleny jako relativní úrovně výkonu vůči referenčnímu vláknem.



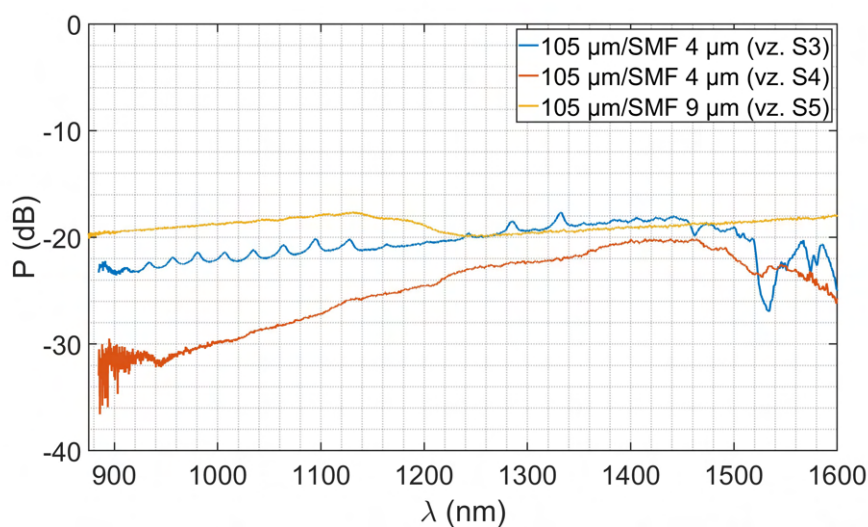
Obrázek 5.2: Spektrální charakteristiky referenčního vlákna FG105LCA 105/125 μm (jádro/plášť).



Obrázek 5.3: Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení u vzorku S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1).



Obrázek 5.4: Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení u vzorku S1 (FG105LCA/OM1/OM2), u vzorku S2 (FG105LCA/OM2) a u vzorku S8 (FG105LCA/OM2).



Obrázek 5.5: Spektrální charakteristiky přímého svarového spojení vláken u vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm), u vzorku S4 (FG105LCA/SMF 4 μm) a u vzorku S5 (FG105LCA/SMF 9 μm).

Nejprve byl změřen vzorek S1 (FG105LCA/OM1/OM2), S2 (FG105LCA/OM2) a S8 (FG105LCA/OM2). Jedná se o vzorky kdy je na 105 μm vlákno přímo navařeno vlákno typu OM1 nebo OM2 v případě vzorku S1 (FG105LCA/OM1/OM2) je na vlákno 105 μm nejprve navařeno vlákno OM1, za které je přímo navařeno vlákno OM2.

Z průběhu na obrázku 5.4 je patrné, že pokud pomineme OH pásy vzorku S8 (FG105LCA/OM2), je celková úroveň přenášeného výkonu u vzorku

S1 (FG105LCA/OM1/OM2) proti očekávání nižší, než u vzorků S2 a S8 (FG105LCA/OM2).

Ačkoliv simulace předpokládaly účinnost přenosu okolo 50-60 % výsledná účinnost zjištěná z naměřeného průběhu je přibližně 16 - 21 %. Pro většinu měřeného spektra dosahuje nejnižších útlumů $\sim 6,7$ dB vzorek S8 (FG105LCA/OM2). Na rozdíl od zbylých dvou vzorků z tohoto grafu však také vykazuje značné útlumy na OH pásech.

U vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm) bylo při bližší kontrole pomocí fiberscopu zjištěno částečné poškození konektoru. Toto poškození se však při měření neprojevilo zvýšením útlumu a dokonce vzorek S4 (FG105LCA/SMF 4 μm), jehož konektory nejevily známky poškození, vykazoval 2-7 dB vyšší útlum oproti vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm). Při použití s vyššími výkony (např. v systémech PoF) by však mohl v vzorku S3 takto poškozený konektor představovat problém. Poškození čela konektoru u vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm) se však projevilo drobným zvlněním spektrální charakteristiky. Spektrální charakteristiky pro vzorky S3, S4 (FG105LCA/SMF 4 μm) a S5 (FG105LCA/SMF 9 μm) jsou na uvedeny obrázku 5.5.

Vzorky S3 a S4 (FG105LCA/SMF 4 μm) mají nejmenší útlum v rozmezí vlnových délek 1400-1460 nm. Pro srovnání byla v téže grafu (obrázek 5.5) vynesena spektrální charakteristika vzorku S5, kdy na vlákno 105 μm je navařeno vlákno SMF 9 μm . Vzorek S5 (FG105LCA/SMF 9 μm) má o necelé 4 dB nižší útlum, než vzorek S3 (FG105LCA/SMF 4 μm) v intervalu 900-1140 nm. Po dosažení mezní vlnové délky napojovaného vlákna v rozmezí 1140-1240 nm dochází postupně k nárůstu útlumu o 2 dB. Předpokládám, že se tak děje v důsledku konverze více vidů do jednoho. Od vlnové délky 1240 nm pak dochází k opětovnému pozvolnému nárůstu úrovně signálu, neboť na těchto vlnových délkách dochází až do konce měřicího rozsahu taktéž k poklesu Rayleighova rozptylu, který má na těchto vlnových délkách rozhodující vliv na útlum vlákna. V případě vzorků S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1) se jedná o situaci, kdy je na vlákno FG105LCA navařeno vlákno o standardu OM1. Tvar spektra pro tyto vzorky je uveden na obrázku 5.3.

Z naměřených spektrálních charakteristik vzorků S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1) byla vypočtena střední hodnota a medián. Aby byly pro obě tyto operace vyloučeny vlnové délky, na kterých jsou získané hodnoty výrazně ovlivněny šumem byla střední hodnota a medián počítány pouze v rozsahu 700-1700 nm. Průměrná hodnota výkonu oproti referenci u vzorku S6 (FG105LCA/OM1) je -8 dB resp. -6,73 dB u vzorku S7 (FG105LCA/OM1). Medián hodnot pro vzorek S6 (FG105LCA/OM1) je -7,99 dB resp. -6,72 dB. Rozdíl výkonových úrovní je tak střední hodnotu i medián přibližně stejný. Rozdíl výkonový úrovní mezi vzorkem S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1) je 1,26 dB dle průměru resp. 1,27 dB dle mediánu. Podobný rozdíl v přenášeném výkonu se projevili i u ostatních měření se vzorky S6 (FG105LCA/OM1) a S7 (FG105LCA/OM1). Rozdílný útlum vzorků přikládám rozdílným kvalitám provedení svaru mezi vlákny FG105LCA a OM1.

Vzorky S9 (FG105LCA/DCF13/OM2), S10 (FG105LCA/DCF13/SMF 9 μm) a S11 (FG105LCA/DCF13/OM1) mají mezi vlákem FG105LCA vřazen 50 cm úsek optického vlákna s dvojitou plášťovou strukturou tzv. DCF vlákna (Double-Clad Fiber). Ve vzorcích 9-11 jde o vlákno DCF13-Thorlabs. Toto vlákno má průměr jádra 9 μm , průměr prvního pláště 105 μm a průměr druhého pláště 125 μm . Vzhledem k vlastnostem a rozměrům je možné u těchto vláken předpokládat zlepšení účinnosti přenosu oproti případům, kdy je proveden pouze přímý svar mezi FG105LCA a navazujícím vláknem.

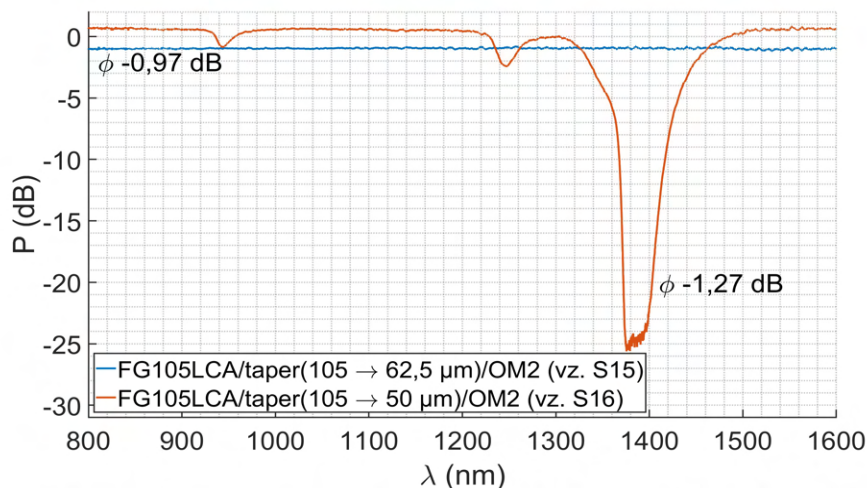
Vzorek S12 je tvořen kaskádou vláken (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM1/taper(62,5 \rightarrow 50 μm)/OM2/taper(50 \rightarrow 9 μm)/SMF 9 μm). Jednotlivé úseky na sebe nejsou navařeny přímo, jako tomu je u většiny ostatních vzorků, ale je využito taperových přechodů. Vzorky byly vyrobeny pomocí zařízení VytranTM. Podrobný popis výroby taperového přechodu je v kapitole 4.3.

V rámci měření byly také testovány vzorky S13 (OM1/OM2) a S14 (OM2/SMF 9 μm). Vzorek S13 (OM1/OM2) byl proměřen v obou směrech. Z tvaru spektra uvedeného na obrázku B.11 v příloze B.6 je zřejmé, že v případě šíření optického záření ve směru OM1/OM2 je účinnost vazby o $\sim 0,9$ dB nižší, než při šíření v opačném směru (OM2/OM1). Na vlnových délkách 1550-1700 nm účinnost vazby pro směr šíření OM1/OM2 však drobně narůstá. Na konci měřeného rozsahu je tak rozdíl účinnosti mezi směry šíření optického záření pouze $\sim 0,4$ dB.

Spektrální charakteristiky vzorku S5 (FG105LCA/SMF 9 μm) a vzorku S14 (OM2/SMF 9 μm) mají podobné tvary. Z toho lze usoudit, že rozhodující vliv na tvar spektra má v těchto případech napojené vlákno SMF 9 μm vlákno. Spektrální charakteristika pro vzorek S5 (FG105LCA) je uvedena na obrázku 5.5. Pro vzorek S14 (OM2/SMF 9 μm) pak na obrázku B.12 v příloze B.6.

Později byly vyrobeny i další vzorky využívající taperované přechody. Tyto vzorky jsou označeny číslem S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2). V případě vzorku S15 je jako vstupní vlákno FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť). Na tomto vlákně je vytvořen taperový přechod, na jehož užším konci je průměr 62,5/74 μm (jádro/plášť). Na užší konec je poté navařeno vlákno OM2, jehož průměr jádra je 50 μm . Mezi špičkou taperu a navařeným vláknem OM2 tak vzniká obdobný přechod, jako při přímém spojení vláken OM1 a OM2. Délka taperového přechodu je 20 mm. Vzorek S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) pak opět využívá taperového přechodu, který je vytvořen na z vlákna FG105LCA. V tomto případě je vlákno taperováno na průměr jádra 50 μm . Průměr pláště na špičce taperu je ~ 59 μm . Délka taperového přechodu je 40 mm. Je třeba si uvědomit že taperové přechody vyrobené z vlákna FG105LCA mají skokový profil indexu lomu. Navařovaná vlákna standardu OM1/OM2 však mají gradientní profil indexu lomu. Z tohoto důvodu mají svary mezi taperovým přechodem a vláknem OM1/OM2 nižší účinnost vazby, než v případě, kdy by bylo napojováno vlákno se skokovou změnou indexu lomu. Spektrální charakteristiky vzorku S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) jsou uvedeny na obrázku 5.6. Na obrázku jsou zároveň vyznačeny průměrné hodnoty

útlumu zobrazené části spektra. Okrajové části, které byly silně ovlivněny šumem nejsou zobrazeny.



Obrázek 5.6: Spektrální charakteristika vzorků S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) využívajících taperovaných přechodů.

Z výsledků na obrázku 5.6 vyplývá, že vlákno s konektorem, které bylo na špičku taperu navařeno pochází ze série, která vykazuje útlumy na OH pásech. Z tohoto důvodu u vzorku S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2) dochází na několika místech spektra (\sim 930-980 nm; 1225-1280 nm; 1300-1460 nm) k výraznému poklesu přenášeného výkonu. Z tohoto důvodu, ačkoliv je mimo OH pásy úroveň výkonu dokonce vyšší, než u referenčního vlákna, je průměrná úroveň výkonu u tohoto vzorku -1,27 dB. Vzorek S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) vykazuje vyšší průměrnou úroveň výkonu a to nejspíše díky absenci OH pásů v charakteristice navařeného vlákna s konektorem. Pokud však pomíneme OH pásy u vzorku S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2), jak ze zřejmé že vzorek S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2) vykazuje vyšší útlum. To je dáno nejspíše ztrátami na přechodu mezi užším koncem taperového přechodu o průměru jádra 62,5 μm a vláknem OM2 s průměrem jádra 50 μm . Přesto se však v porovnání s ostatními metodami vazby využívající optická vlákna využití taperu jeví jako nejlepší metoda pro navázání výkonu z vlákna o větším průměru jádra do vlákna s menším průměrem jádra.

■ Spektrum komerčně dostupného taperovaného vzorku MH GoPower

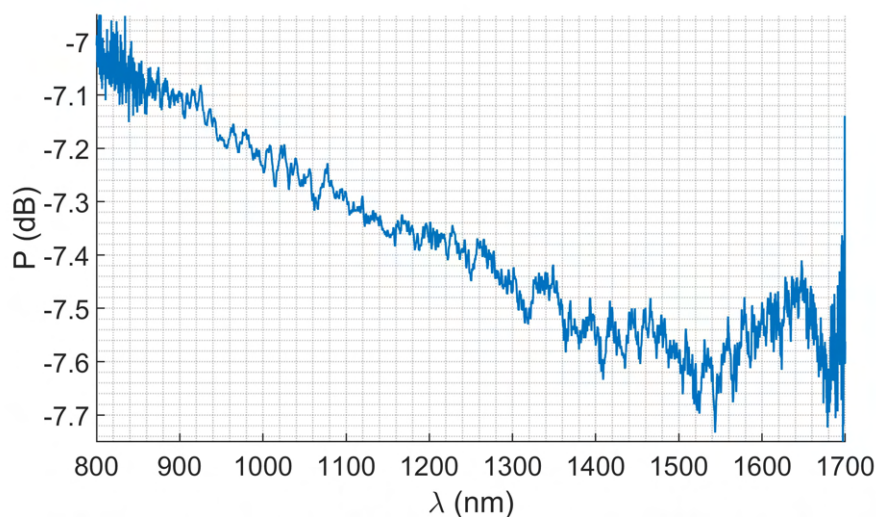
Účinnost vzorků využívajících kónický zužovaného vlákna - taperu, vyrobených pomocí zařízení VytranTM ing. Tomášem Martanem Ph.D., byly porovnány s komerčně dodaným vzorkem MH GoPower.

Vzorek je dodán Taiwanskou společností MH GoPower. Vzorek nese označení 1x1MFA-D01-2-2-FC-B a společnost ho označuje jako Mode Field Adaptér (Adaptér pro průměr vidového pole). Vlastní taper je uložen v kvádrovém obalu o rozměrech $14 \times 10 \times 80$ mm. Z čelních stran ochranného obalu jsou vyvedena vlákna o délce jeden metr. Vlákno s černou ochrannou bužírkou je vlákno s rozměrem $105/125$ μm (jádro/plášť) a NA 0,22. Vlákno bílé barvy je vlákno s rozměry $50/125$ μm (jádro/plášť) a NA 0,2. Obě vlákna jsou zakončená konektorem FC/PC. Výrobce dále uvádí, maximální vložené ztráty 5 dB. Vzorek je schopen přenášet až 20 W optického výkonu.

Nejprve byl vzorek od společnosti MH GoPower zkoumán z hlediska spektrální charakteristiky.

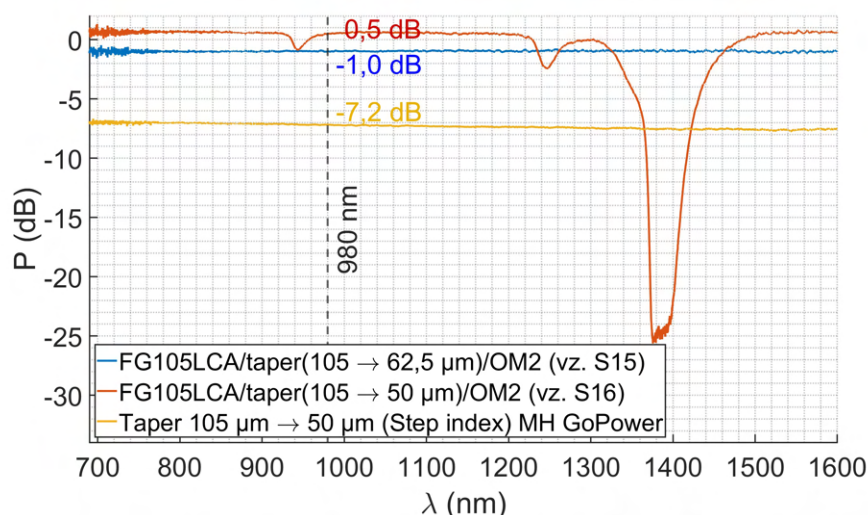
Nejprve byl pomocí vlákna FG105LCA připojen širokospektrální zdroj SLS201L/M ke spektrálnímu analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C a byla naměřena referenční úroveň signálu napříč spektrem. Vlákno je podobně jako v ostatních měřeních bráno jako referenční.

Po určení vztažné výkonové úrovně byl vzorek připojen pomocí referenčního vlákna FG105LCA k širokospektrálnímu zdroji SLS201L/M od Thorlabs, Inc. Výstupní vlákno s bílou ochrannou bužírkou bylo připojeno ke spektrálnímu analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C. Spektrální charakteristiku zkoumaného vzorku se vypuštěnými zašuměnými okrajovými částmi jsou uvedeny na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7: Spektrální charakteristika vzorku MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B.

Na obrázku 5.8 je spektrum adaptéru průměru vidového pole MFA MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B porovnáno s taperovanými vzorky S15 (FG105LCA/taper($105 \rightarrow 62,5$ μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper($105 \rightarrow 50$ μm)/OM2) vytvořenými na zařízení VytranTM.



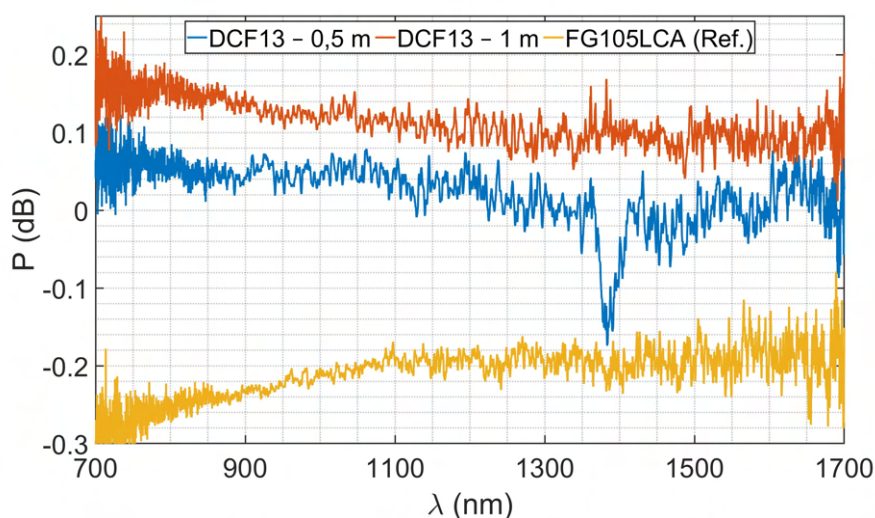
Obrázek 5.8: Porovnání spekter vzorků využívajících vláknových taperů vyrobených pomocí zařízení VytranTM a adaptéru stopy pole MFA MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B.

Z obrázku 5.8 je patrné, že vzorek MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B vykazuje vyšší vložný útlum ($\sim -7,3$ dB), než je maximální vložný útlum deklarovaný výrobcem (≤ 5 dB). Útlum navíc s rostoucí vlnovou délkou lehce narůstá. Tato tendence je dobře znatelná na obrázku 5.7 kdy rozdíl úrovní výkonů na vlnové délce 800 nm a 1550 nm je $\sim 0,6$ dB. Důvodem naměřeného vyššího vložného útlumu může být vliv použití více konektorových spojek (oproti prostému měření optického výkonu) pro připojení ke spektrálnímu analyzátoru YOKOGAWA A6370C a také vliv odlišného prfilu indexu lomu u OM2 vlákna, které je na vstupu spektrálního analyzátoru předřazeno. V grafu na obrázku 5.8 jsou vyznačeny změřené útlumy při vlnové délce 980 nm. Nejlepší účinnost přenosu byla změřena u vzorku S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm)/OM2), která byla při vlnové délce 980 dokonce vyšší než hodnota naměřená u referenčního vlákna. Pokles výkonové úrovně o 1 dB při vlnové délce 980 nm byl naměřen u vzorku S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2). Největší útlum byl naměřen u vzorku MH GoPower -7,2 dB.

Spektrální charakteristika vlákna s dvojitou plášťovou vrstvou (DCF13)

Během této série měření byly také zkoumány dva vzorky vlákna s dvojitou plášťovou vrstvou DCF13-Thorlabs, které byly na koncích osazeny konektory FC/PC. Hodnoty získané měřením pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C jsou uvedeny na obrázku 5.9. Kladná relativní výkonová úroveň naznačuje, že měřená vlákna DCF13-Thorlabs dosahují nižších ztrát optického výkonu oproti referenčnímu vláknu FG105LCA. Graf naznačuje, že rozdíl útlumu mezi DCF vlákny a referenčním vláknem FG105LCA s rostoucí

vlnovou délkou postupně klesá. Delší úsek DCF vlákna vykazuje větší účinnost přenosu a to v průměru o 0,1 dB resp. dle mediánu o 0,08 dB. Metrový úsek vlákna v průměru i v mediánu vykazoval o 0,11 dB vyšší úroveň přenosu oproti referenčnímu vláknu. Půlmetrový úsek vykazoval zlepšení oproti referenci v průměru o 0,02 dB resp. V mediánu o 0,03 dB. Nicméně rozdíl průměrných výkonových a mediánových úrovní oproti referenčnímu vláknu je natolik nízký, že nelze s jistotou určit, zda ke zvýšení účinnosti nedošlo spíše vlivem konektorů, jejichž útlum se může pohybovat až okolo 0,5 dB.



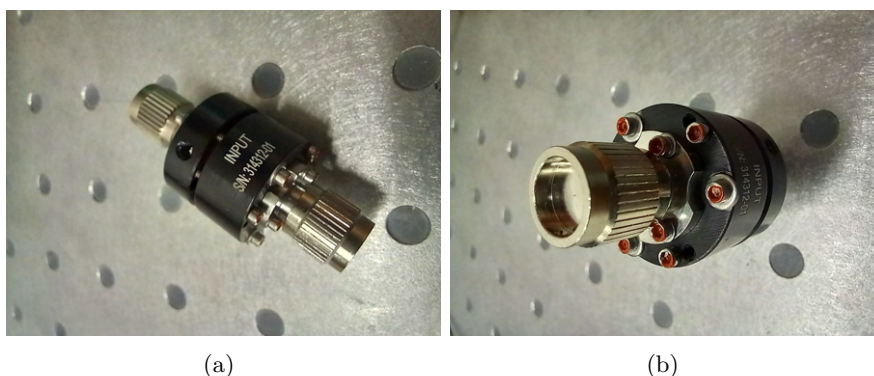
Obrázek 5.9: Spektrální charakteristika vlákna s dvojitým pláštěm DCF13-Thorlabs v porovnání s referenčním vláknem FG105LCA.

Spektrální charakteristika čočkového konektoru OZ Optics

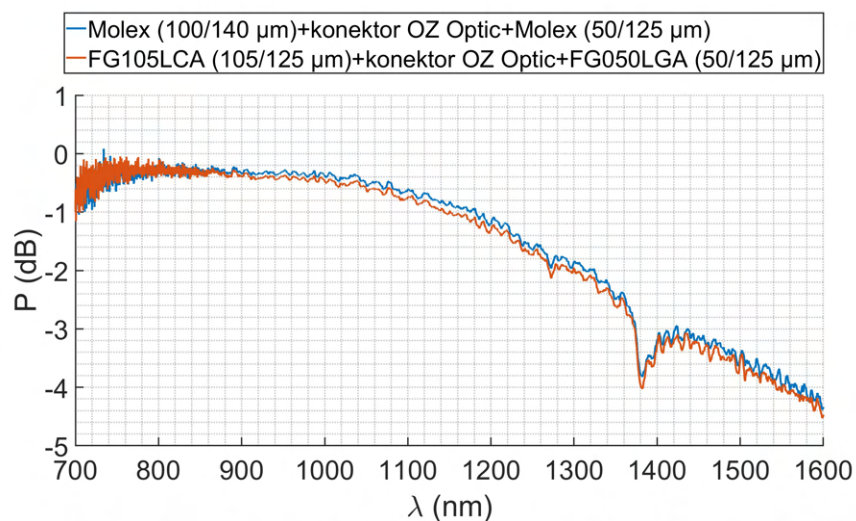
Tato práce zahrnuje také měření spektrálních charakteristik při použití čočkového konektoru OZ Optics. Tento konektor je primárně určen pro spojování vláken s odlišnými NA a s různými průměry a tvary jader. Měření účinnosti vazby je popisováno v podkapitole 5.4. Čočkový konektor využívá soustavy čoček, které nejprve rozbíhavý optický svazek na výstupu vstupního vlákna kolimují a následně tento svazek soustředí do navazujícího vlákna. Čočkový adaptér je osazen konektory FC/PC. Fotografie čočkového adaptéru je uvedena na obrázku 5.10.

Spektrální charakteristiky byly měřeny na plném rozsahu spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C, s krokem 1 nm a nastavenou citlivostí „HIGHT2“. Naměřenou spektrální charakteristiku čočkového adaptéru, s vynecháním vlnových délek silně ovlivněných šumem v rozsahu 600-700 nm uvádí obrázek 5.11. Spektrum bylo měřeno pro sestavy sestavy vláken, kdy v první bylo pomocí konektoru propojováno vlákno s průměrem 100/140 μm (jádro/plášť) a vlákno FG050LGA. V druhé sestavě byla propojována vlákna

FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť) a FG050LGA s průměrem 50/125 μm (jádro/plášť). Vlákná použitá v obou sestavách mají skokový profil indexu lomu. Konektor je optimalizovaný pro vlákno s průměrem 100/140 μm (jádro/plášť), účinnost sestavy se zapojením tohoto vlákna je oproti sestavě s vlákem FG105LCA vyšší v průměru o 0,7 dB. Z grafu na obrázku 5.11 je zřejmé, že pro delší vlnové délky je účinnost vazby nižší.



Obrázek 5.10: Fotografie hybridního čočkového konektoru OZ Optics a) boční pohled, b) pohled shora.



Obrázek 5.11: Spektrální charakteristika čočkového konektoru OZ Optics.

Ve spektru je také zřetelný útlum OH pásu s jeho maximem maximem na ~ 1380 nm. V intervalu vlnových délek (700-1050 nm) dojde k poklesu účinnosti vazby pouze o 0,2 dB, v rozmezí 1050-1360 nm (1360 nm počátek projevujícího se OH pásu) je pokles účinnosti vazby přibližně o 2 dB. V celém měřeném rozsahu pak dochází k poklesu přibližně o 4 dB. Na vlnové délce 980 nm vykazuje vzorek útlum 0,4 dB.

5.2 Měření vlastností konektorových spojů

Tato série měření ověřuje vlastnosti propojení vláken pomocí konektorových spojek. Konektorové spojení umožňuje snadno, rychle a opakovatelně (jedná se o rozebíratelné spojení) vytvořit různé varianty propojení vláken s rozdílnými materiálovými a geometrickými vlastnostmi. Použití konektorů však sebou přináší obvykle vyšší útlum spoje, než je tomu např. při propojení pomocí svaru. Ačkoliv se kvůli výše zmíněným skutečnostem zdá být metoda propojování pomocí konektorů pro aplikace PoF nevhodná, sloužilo toto měření k praktickému ověření vlastnosti vazby vláken spojovaných pomocí konektorů a následné možnosti porovnání se slibnějšími metodami spojování vláken o různých průměrech jader.

Během sestavování a přepojování je zapotřebí provádět čištění konektorů, pomocí čistících kazet, bezprašných ubrousků a isopropylalkoholu nebo stlačeného vzduchu. Čistota konektoru byla kontrolována pomocí fiberscopu připojenému k počítači a v případě potřeby byl konektor opětovně očištěn.

Pro experimenty jsem používal konektorové propojky FC/PC a FC/APC. Pro připojení laserů, které využívají na svém výstupu konektor FC/APC byla použita hybridní propojka (patchcord), tvořena vláknem FG105LCA osazená z jedné strany konektorem FC/APC a z druhé FC/PC. Pokud laser využíval výstupní konektor s kolmým broušením FC/PC byla použita propojka se dvěma konektory FC/PC. Díky skutečnosti, že byly k dispozici popsané varianty spojek s vláknem FG105LCA, bylo možné použít více typů laserových zdrojů (jak s FC/APC, tak FC/PC).

U všech dostupných použitých laserů byla nejprve vláknem FG105LCA změřena referenční úroveň výkonu. Propojka s požadovanými konektory byla pak volena na základě typu výstupního konektoru laserového zdroje. Po změření referenčního výkonu byl poté mezi detektor a konec referenčního vlákna připojen pomocí konektorových spojek další úsek s příslušným typem vlákna popř. vláknem. Celkem bylo vytvořeno 15 různých kombinací zapojení. Přehled vzorků využívajících konektorových spojů je uveden v tabulce 5.5.

Do tabulky 5.6 jsou zaznamenány výkony, pro režim laseru bez zařazeného útlumového článku. Výkony naměřené ve všech základních režimech včetně zařazených útlumových článků (režimy P_1 a P_2) jsou zaznamenány v μW v tabulkách B.5 a B.6. Do tabulek B.7 a B.8 jsou zaznamenány výkony v dB v příloze B.3.

Hodnoty, které tabulka 5.6 obsahuje jsou vypočtené z hodnot získaných při měření kaskád vláken spojovaných pomocí konektorových spojek. Výkon laseru OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) je příliš nízký, a proto je signál na konci tras zakončených vláknem SMF s průměrem jádra $4 \mu\text{m}$ je nižší, než je nejnižší měřitelná hodnota detektorové fotodiody. V těchto případech je v tabulce 5.6 uvedeno „Neměřitelné“. Hodnoty výkonů při všech třech výkonových režimech laseru (P_2 , P_1 , P_0) odečtené na vyhodnocovací konzoly jsou zaznamenány v tabulkách B.5 a B.6, v příloze B.3. Výkony jednotlivých sestav byly měřeny pomocí detektorů S155C a S415C, které byly připojeny k řídicí konzoly PM200. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 5.6.

Tabulka 5.5: Přehled vzorků s konektorovými spoji. (Znaménko „+“ v popisech značí konektorový spoj.)

číslo vzorku	Označení vzorku
K1	FG105LCA+OM1+OM2
K2	FG105LCA+OM1
K3	FG105LCA+OM2
K4	FG105LCA+SMF 9 μm
K5	FG105LCA+SMF 4 μm
K6	FG105LCA+OM1+OM2++SMF 9 μm +SMF 4 μm
K7	FG105LCA+OM1+SMF 4 μm
K8	FG105LCA+OM2+SMF 4 μm
K9	FG105LCA+SMF 9 μm +SMF 4 μm
K10	FG105LCA+DCF13
K11	FG105LCA+DCF13+FGF105LCA
K12	FG105LCA+DCF13+OM1
K13	FG105LCA+DCF13+OM2
K14	FG105LCA+DCF13+SMF 9 μm
K15	FG105LCA+DCF13+SMF 4 μm

Tabulka 5.6: Výstupní výkon vzorků propojených pomocí konektorových spojek FC/PC při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm), OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm), OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj.)

	λ (nm)	808	850	976	1550
Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	P (dB)	P (dB)	P (dB)	P (dB)
K1	105+62,5+50	-16,1	-7,15	-6,7	-6,4
K2	105+62,5	-4,5	-4,4	-4	-1,1
K3	105+50	-7,2	-4,9	-6,4	-7,1
K4	105+9	-28,1	-24,4	-20,9	-28,5
K5	105+4	-51,9	-27,8	-26,4	Neměřitelné
K6	105+62,5+50+9+4	-28,2	-27,4	-27,9	Neměřitelné
K7	105+62,5+4	-16,5	-25,8	-26	Neměřitelné
K8	105+50+4	-22,9	-25,6	-26,7	Neměřitelné
K9	105+9+4	-27,5	-25,3	-29,4	Neměřitelné
K10	105+9(105)	0	-0,3	-2,2	1,8
K11	105+9(105)+105	-0,1	-0,7	-2,5	1,8
K12	105+9(105)+62,5	-4,5	-5,8	-5,9	-1,8
K13	105+9(105)+50	-6,8	-6,9	-7,6	-5,3
K14	105+9(105)+9	-22,6	-25,1	-23,2	-19,4
K15	105+9(105)+4	-30,7	-29,3	-27,4	Neměřitelné

Z hodnot zaznamenaných v tabulkách B.7 a B.8 z přílohy B.3 byla vypočítána relativní účinnost přenosu optické energie oproti případu při použití referenčního vlákna. Aby byly co nejvíce potlačeny chyby měření, byl z vypočtené relativní účinnosti určen aritmetický průměr. Jelikož se mezi vypočtenými daty vyskytují i data s velkou odchylkou byl společně s aritmetickým průměrem vypočten i medián. Výsledné hodnoty z těchto měření byly vyneseny do grafů na obrázku 5.12. Největší chyby měření lze očekávat u vzorků s nízkým naměřeným výstupním výkonem. Hodnoty nižší, než 250 μW značně kolísaly a měnily se i při jakémkoliv kontaktu se vzorkem. K nestálosti naměřených výsledků přispívá i srovnatelné výkonové úrovně výstupního optického záření a šumu.

Z naměřených hodnot v tabulce 5.6 lze vyzorovat vliv konektorových spojek. Pokud je do sestavy zakončené vláknem OM2 vřazen úsek vlákna OM1 dojde k poklesu přeneseného výkonu o několik jednotek procent.

Z výsledků se zdá, že postupnou redukcí dochází k lepšímu přizpůsobení MFD a nižším ztrátám při přenosu. Proti této skutečnosti však působí nestability a útlumy na konektorech. Z tohoto důvodu je v případě kaskády vláken 105+62,5+50 na Obrázku 5.12(a) účinnost propojení dokonce nižší, neboť se zde projevil vliv konektorových spojek a rozdíl MFD mezi vloženým a koncovým vláknem není již tak veliký.

Dále jsou na Obrázku 5.12(a) porovnávány případy, kdy sestava je zakončena SMF vláknem o průměru jádra 9 nebo 4 μm . Zde se potvrzuje, že u konfigurací, které jsou zakončeny SMF vláknem dochází k silnému útlumu a efektivitě přenosu dosahují nižších desetin procenta.

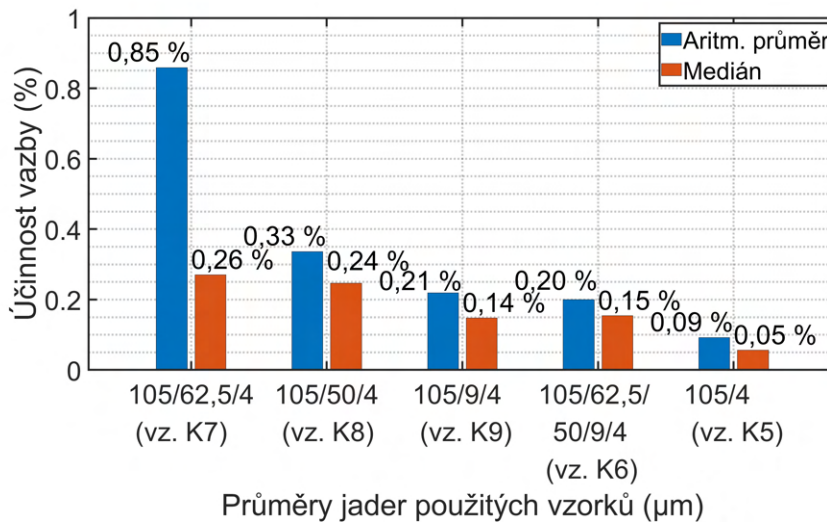
U sestav zakončených vláknem SMF 4 μm jsou útlumy (jejich mediány) při vřazení vláken OM1 i OM2 srovnatelné. V případě kaskády 105+62,5+50+9+4, kdy jsou však za sebou tato vlákna řazena společně s úsekem vlákna SMF-28 a musí být zde být přidány další dvě konektorové spojky, je výstupní naměřený výkon nižší. Výstupní výkon je však srovnatelný se situacemi, kdy je sestava tvořena přímým spojením vlákna FG105LCA a jednovidového vlákna. Z Obrázku 5.12(b) vyplývá, že vliv konektorů je vyšší u sestav zakončených vícevidovými vlákny. U vzorků zakončených jednovidovým vláknem je útlum konektoru v kontrastu se ztrátami vlivem nepřizpůsobení vidového pole zanedbatelný.

Kaskády s nižším počtem stupňů však mají kladný vliv na účinnost vazby, byť jen o 0,1-0,12 %

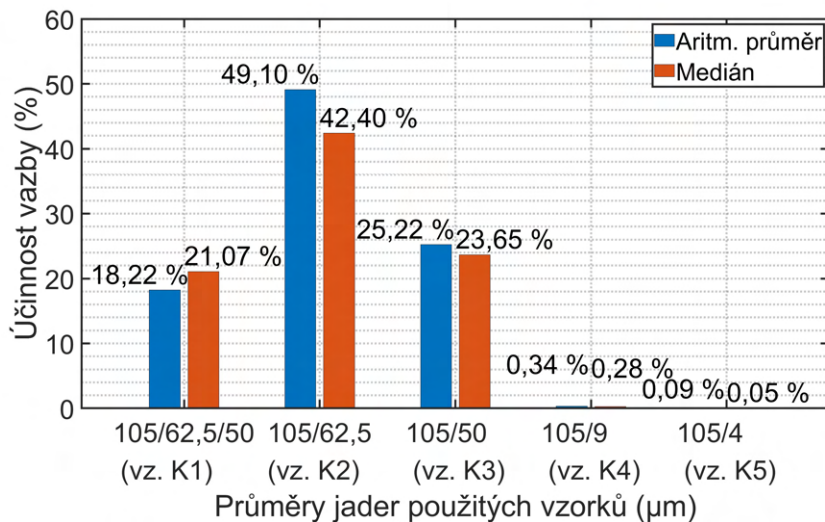
Útlumy na konektorech také pravděpodobně mají klíčovou roli u sestav využívajících DCF vlákno. Pokud uvažujeme útlum 0,5 dB na dvou konektorech dostaneme pokles oproti původní úrovni přibližně o 20 % což koresponduje s hodnotami na obrázku 5.13.

Zařazení úseku DCF vlákna připojeného pomocí konektorů vykazuje průměrný pokles účinnosti přenosu při napojování vlákna standardu OM1 o 12,34 % (medián 8,64 %) oproti případu, kdy není vřazeno DCF vlákno. Pro vlákno OM2 došlo vřazením DCF vlákno o pokles 3,51 % (medián 2,76 %), oproti hodnotám bez využití DCF vlákna. Dle změřených výsledků však dvouplášťové vlákno DCF13 zvyšuje účinnost přenosu v případě, kdy jsou napojována

SMF vlákna. Pro případ SMF vlákna s průměrem jádra 9 μm přenáší sestava bez DCF vlákna o 0,25 % (medián 0,23 %) méně energie oproti případu s zařazeným DCF vláknem. Při napojení SMF vlákna s průměrem jádra 4 μm pak situace bez DCF vlákna přenáší o 0,03 % (medián 0,06 %) méně energie oproti stavu se zařazeným DCF vláknem.

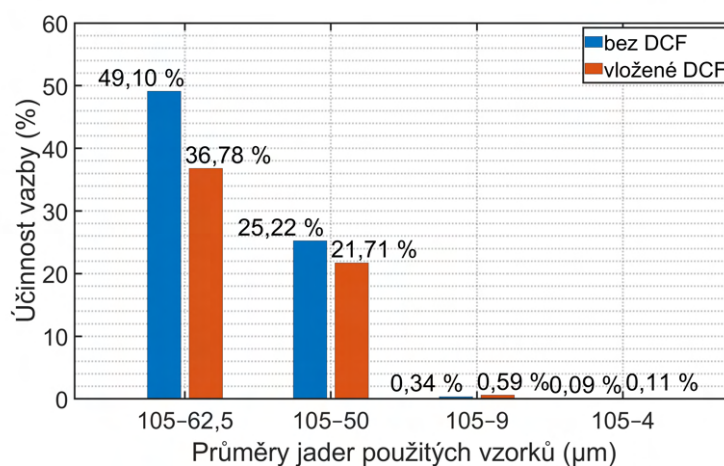


(a)

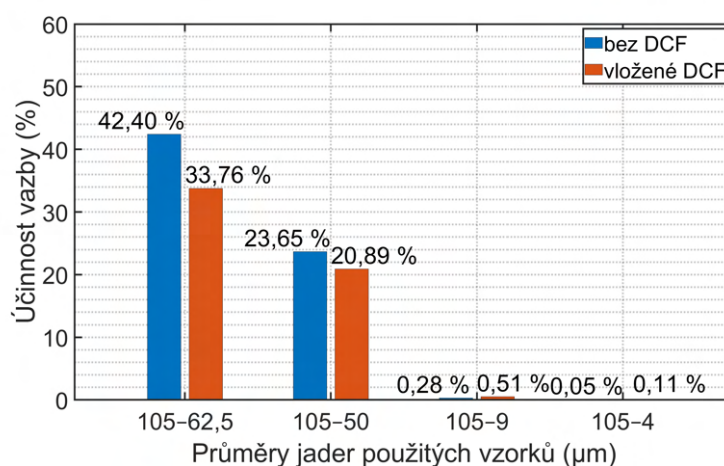


(b)

Obrázek 5.12: Účinnost vazby u měřených vzorků využívajících konektorových spojek, a) zakončenými vláknem SMF 4 μm , b) srovnání účinností vzorků s odlišnými průměry výstupních vláken.



(a)



(b)

Obrázek 5.13: Účinnost vazby u vzorků využívajících DCF vlákno v porovnání se vzorky, které DCF vlákno nevyužívají, a) aritmetický průměr, b) medián. V grafu je uvedeno vstupní a výstupní vlákno.

Zjištěné výsledky mohou být v případech, kdy jsou výstupem SMF vlákna zatížené velkou chybou měření. Důvodem jsou příliš malé výstupní výkony (jednotky, až nižší stovky μW), které se přibližují úrovni šumu pozadí. V měření v tomto rozsahu se navíc projeví sebemenší vliv okolí například proudění vzduchu, drobné otřesy při chůzi laboratoří nebo pnutí vlákna.

5.3 Měření vlastností vzorků s přímým navařením

V této části diplomové práce je popsáno ověření účinnosti vazby při přímém svaru dvou vláken o různých průměrech. Tato kapitola si klade za cíl popsat rozdíly mezi hodnotami získanými ze simulací v prostředí BeamPROP (viz kapitola 3.1) a naměřenými výsledky.

K proměření účinnosti přenosu optického záření byly použity zdroje optického výkonu SAFIBRA, s.r.o a OPTOKON, a.s. Laserové zdroje SAFIBRA, s.r.o. pracují na vlnových délkách 650, 808, 850, 976, 1550 nm. SAFIBRA, s.r.o. zdroje SLED pracují na vlnových délkách 1298, 1474, 1565 nm. Laserové zdroje OFT-840 a LS-800, které jsou součástí síťových diagnostických zařízení OPTOKON, a.s., pracujících na vlnových délkách 1310 (OTF-840), 1490 a 1550 nm (LS-800). U zařízení LS-800 lze mezi oběma lasery během provozu libovolně přepínat. Měření bylo provedeno pomocí metody vložných ztrát (viz kapitola 4). Zároveň byly použité různé typy laserů s různými vlnovými délkami, tak aby byla ověřeno chování přímo navařeného vlákna i z hlediska měnící se vlnové délky. Výstup vlákna byl připojen v závislosti na maximálním deklarovaném optickém výkonu optického zdroje buď k měřicímu vláknovému detektoru S155C pro výkony do 20 mW nebo k detektoru S415C pro výkony nad 20 mW. Nejprve bylo opět změřeno vlákno FG105LCA 105/125 μm (jádro/plášť) pro změření referenční úrovně výkonu a poté byly proměřeny jednotlivé vzorky. Přehledy naměřených hodnot výkonů na výstupech jednotlivých zkoumaných vzorků s přímou navázkou vlákna s odlišným průměrem jádra jsou uvedeny v příloze B.4.

Kromě laserů byl také měřen vliv výstupního výkonu vzorků při použití širokospektrálních SLED. Konkrétně byly použity zdroje OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm), OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm), OFLS-B-55-10-100-C, ($\lambda = 1565$ nm). Všechny použité zdroje SLED, které jsem měl k dispozici jsou od výrobce SAFIBRA, s.r.o. Měření výstupních výkonů vzorků proběhlo v případě zdrojů s SLED jak pro oba předřazené útlumové články (P_2 , P_1) tak pro režim bez předřazeného útlumového článku (P_0), aniž by bylo nutné použít detektor S415C, neboť u žádného zařízení s SLED maximální hodnota vyzařovaného optického výkonu uváděná na štítku nepřesahovala 20 mW.

Přesto že vzorky byly prosvěcovány různými typy laserů vyzařujících na odlišných vlnových délkách, poměry výkonových úrovní mezi jednotlivými vzorky jsou si podobné jak vyplývá z obrázků 5.14, 5.15, 5.16 a 5.17. Rozdíly mezi jednotlivými výsledky jsou s největší pravděpodobností způsobeny vlivem FC/PC konektorů, kterými byly jednotlivé vzorky připojovány ke zdrojům optického záření a měřicímu detektoru připojeného k řídicí konzoli PM200.

Rozdíly naměřených hodnot v tabulkách B.9, až B.14 v příloze B.1 oproti hodnotám naměřených a zaznamenaných v tabulkách 5.7, 5.8 a 5.9 uvedených v této kapitole jsou způsobeny několika důvody. Vícevidová vlákna jsou náchylná na makrohyby a stresování vlákna. Mohlo tedy dojít k vnitřnímu pnutí z důvodu tvarové paměti vlákna.

Podstatným důvodem také je, že při měření výkonových úrovní i spektrálních charakteristik bylo použito další předřazené vlákno OM2. Účelem předřazeného vlákna je zamezení nadměrného opotřebování vstupního optického konektoru spektrálního analyzátoru, neboť je manipulováno pouze s druhým koncem vlákna, které je v případě potřeby možné snáze vyměnit. Vlákno OM2 bylo zvoleno z důvodu kalibrace a uzpůsobení konektoru spektrálního analyzátoru pro tento druh vláken.

Tabulka 5.7: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. pracujících na vlnové délce 650, 808, 850, 976 a 1550. (V případě vlákna dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9 až S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště. Lomítko značí svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra před šipkou na průměr jádra za šipkou).

	λ (nm)	650	808	850	976	1550
Číslo vzorku	Průměry jader optických vláken (μm)	P (dB)				
S1	105/62,5/50	-1,4	-6,8	-5,9	-6,4	-6,2
S6	105/62,5	-0,4	-4	-4,6	-4,3	-4,1
S7	105/62,5	-3	-6,8	-6,7	-7	-6,8
S2	105/50	-1,8	-8,1	-5,9	-6,7	-13,3
S8	105/50	-0,9	-5,7	-5	-5,7	-4,8
S5	105/9	-10,8	-22,3	-19,6	-20,1	-24,5
S3	105/4	-21,4	-22,4	-26,6	-25,9	-54,5
S4	105/4	-22,3	-23,1	-27,8	-26,8	-46,9
S10	105/9(105)/9	-15,8	-14,7	-16,4	-17,8	-21,5
S9	105/9(105)/50	-2,1	-6,7	-7	-3,5	-6,3
S11	105/9(105)/62,5	-0,4	-4,6	-4,1	-3,2	-4,6
S12	105/taper(105→62,5)/62,5/taper(62,5→50)/50/9	-15,4	-20	-19,7	-14,8	-19,2

Tabulka 5.8: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm), OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm) a OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm). (V případě dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9 až S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště. Lomítko značí svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra před šipkou na průměr jádra za šipkou).

	λ (nm)	1298	1474	1565
Číslo vzorku	Průměry jader optických vláken (μm)	P (dB)		
S1	105/62,5/50	-7,46	-2,8	-2,7
S6	105/62,5	-0,9	-1,3	-0,5
S7	105/62,5	-2,7	-2,8	-2,8
S2	105/50	-6,9	-4,2	-3,2
S8	105/50	-6,9	-2,6	-2
S5	105/9	-22,2	-19,8	-37,2
S3	105/4	-24,5	-23,1	-37,4
S4	105/4	-23,3	-28,8	-40,1
S10	105/9(105)/9	-23	-14	-17,1
S9	105/9(105)/50	-8	-4,1	-3,6
S11	105/9(105)/62,5	-5	-6,8	-1,4
S12	105/taper(105→62,5)/62,5/taper(62,5→50)/50/9	-21	-17,9	-15,5

Tabulka 5.9: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů síťových diagnostických zařízení OPTOKON, a.s. (V případě dvouplášťového vlákna DCF13 (součást vzorků S9, S10, S11) je před závorkou uveden průměr jádra a v závorce pak průměr prvního pláště vlákna. Lomítko značí nerozebitelný svarový spoj. Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).

	λ (nm)	1310	1490	1550
Číslo vzorku	Průměry jader optických vláken (μm)	(dB)		
S1	105/62,5/50	-7,35	-6,77	-6,74
S6	105/62,5	-3,70	-3,99	-4,17
S7	105/62,5	-6,55	-7,74	-6,81
S2	105/50	-6,67	-7,21	-6,28
S8	105/50	-6,08	-5,37	-5,19
S5	105/9	-22,69	-22,04	-22,05
S3	105/4	-25,45	-35,22	-36,28
S4	105/4	-29,27	-43,46	-56,28
S10	105/9(105)/9	-24,24	-16,79	-17,14
S9	105/9(105)/50	-5,85	-6,93	-7,53
S11	105/9(105)/62,5	-3,67	-3,09	-23,16
S12	105/taper(105→62,5)/62,5/taper(62,5→50)/50/9	-22,28	-26,47	-22,64

Pro ověření správnosti spektrálním analyzátozem naměřených výkonových úrovní bylo v měřeních popisovaných v příloze B.1 voleno stejné vlákno OM2. Tento způsob zapojení navíc stejně jako u spektrálního analyzátoru minimalizoval opotřebování zabudovaných konektorů na laserech. V tomto případě hrají roli rozdílné průměry jader a zařazení další konektorové spojky. Některé SLED a také některé lasery bylo během jednotlivých sérií měření nutné podrobit servisním opravám a proto došlo ke zmenšení ztrát a navýšení výkonu. V některých případech také mohl být použit jiný laserový zdroj, který vyzářuje na shodné vlnové délce, v případě, že zdroj z předešlých měření nebyl pro dané měření k dispozici.

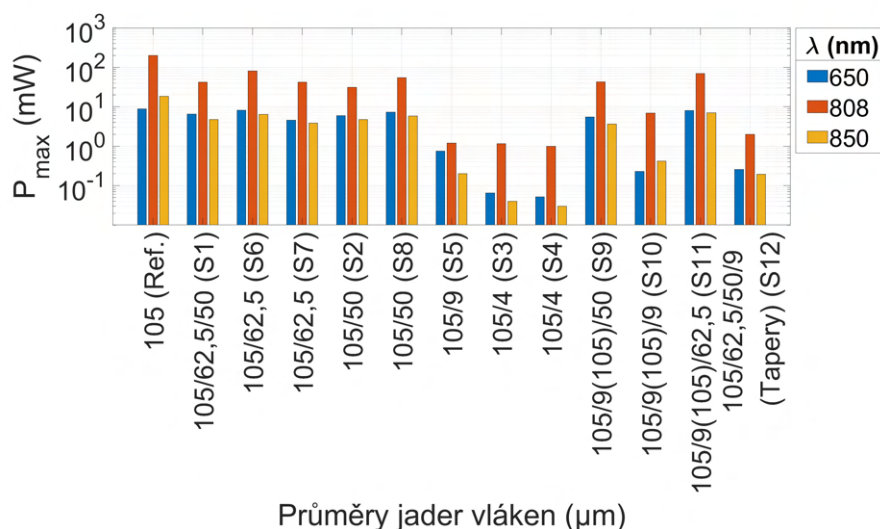
Měření uvedená v této podkapitole (5.3) neměla za cíl ověřovat správnost hodnot ze spektrálního analyzátoru. Z tohoto důvodu nebylo v rámci těchto měření před vzorky předřazováno jako referenční vlákno OM2, ale vlákno FG105LCA.

Obrázky 5.14 až 5.17 potvrzují předpoklad, že největší ztráta energie nastává při napojení vláken s velkými rozměry jádra na vlákna s malými průměry jader. Až na výjimky vykazoval největší útlum vzorek S4 (FG105LCA/SMF 4 μm) a to i přes to, že konektor u tohoto vzorku vykazuje menší opotřebení, než u vzorku S3 (FG105LCA/SMF 4 μm).

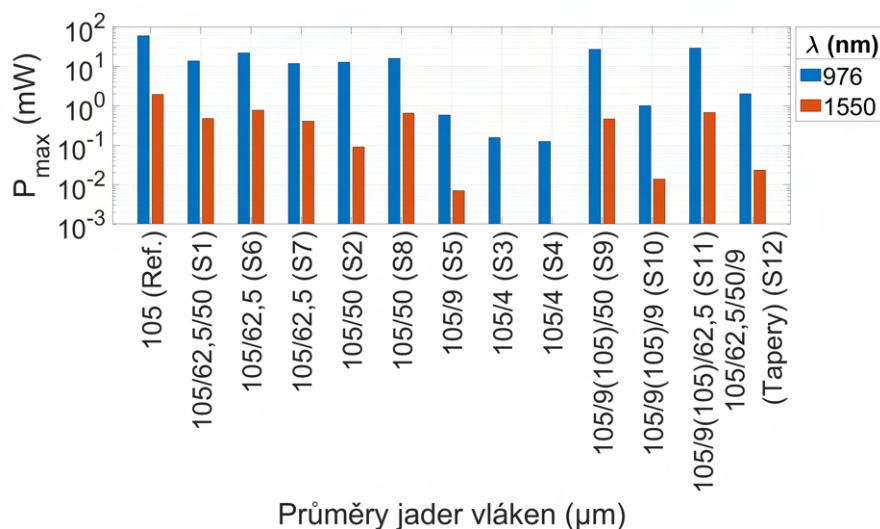
Je vhodné poznamenat, že především u vzorků s nízkou účinností přenosu, (vysokým útlumem) byly výsledné hodnoty velmi citlivé na ohyb a náhodné doteky. Také z tohoto důvodu byla vypočtena relativní účinnost oproti situaci při zapojení referenčního vlákna FG105LCA a pomocí těchto hodnot

byl vypočten aritmetický průměr a medián. Tyto hodnoty pak snižují vliv náhodných stresových prvků působící na vlákno. Průměrná relativní účinnost přenosu pro každý vzorek je uvedena v tabulce 5.10

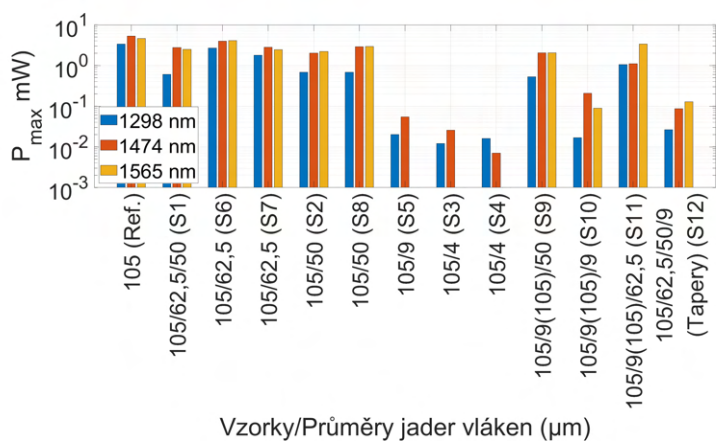
Změřené hodnoty byly dále porovnány se závěry simulací v prostředí BeamPROP. Obecně lze říct, že naměřené výstupní výkony jednotlivých vzorků byly nižší než předpovídaly výstupy simulací. Procentuální účinnosti získané měřením a hodnoty účinnosti dle simulací jsou uvedeny v tabulce 5.10.



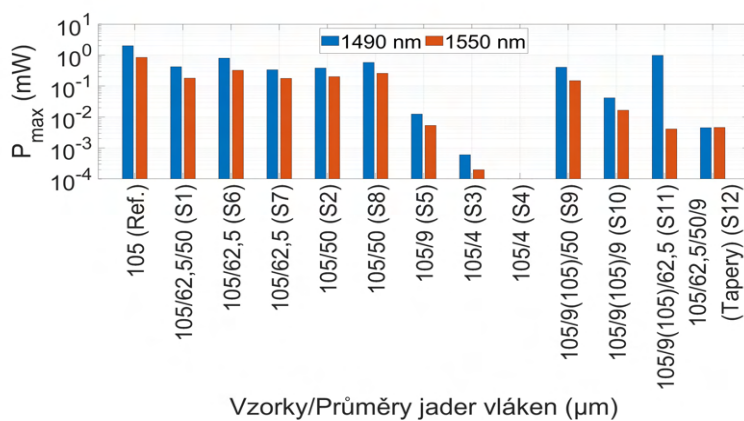
Obrázek 5.14: Maximální výstupní výkony laserů SAFIBRA. s.r.o, pracujících na vlnové délce 650, 808 a 850 nm.



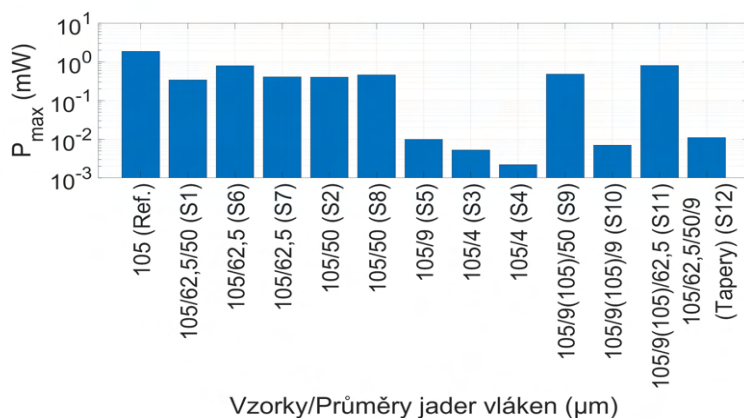
Obrázek 5.15: Maximální výstupní výkony laserů SAFIBRA. s.r.o, pracujících na vlnové délce 976 a 1550 nm.



Obrázek 5.16: Výstupní výkony SLED SAFIBRA $\lambda = 1298, 1474$ a 1565 nm.



(a)



(b)

Obrázek 5.17: Výstupní výkony při použití laserů v zařízeních OPTOKON, a.s., a) pro vlnové délky 1490 a 1550 nm (zařízení OFT-840), b) 1310 nm (zařízení OFT-840).

Rozdíl mezi simulovanými a měřenými hodnotami lze do určité míry vysvětlit tím, že simulace předpokládá ideální propojení vláken a do výpočtů tedy nezahrnuje nedokonalosti svarů a útlumy konektorových propojek. Po vypočtení relativního rozdílu výkonových úrovní (po znormailizování výkonů) zjistíme, že rozdíl mezi simulovanými a měřenými hodnotami se pohybuje od 0,21 - 2 dB což by mohlo odpovídat útlumu na konektorových spojích a popřípadě útlumu na svarech vlákna. U spojů s přímým navařením jednovidového vlákna s průměry jader 4 a 9 μm se tyto hodnoty pohybují od 4,51-7,53 dB. Lze se tedy domnívat, že navýšení útlumu je způsobeno, rozdílnými konstrukcemi vlákna a výraznější konverzí a redukcí vidů.

Tabulka 5.10: Porovnání účinnosti vazby pro nasimulovaná a změřená data u svařovaných vzorků při vlnové délce 980 nm. (Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).

Číslo vzorku	Průměry jader optických vláken (μm)	Simulace (%)		Naměřené hodnoty (%)	
		průměr	medián	průměr	medián
S1	105/62,5/50	34,15	34,18	35,63	25,17
S6	105/62,5	50,84	50,97	60,87	48,70
S7	105/62,5	50,84	50,97	35,92	25,39
S2	105/50	26,47	25,28	31,76	23,53
S8	105/50	26,47	25,28	39,49	33,04
S5	105/9	1,75	1,74	2,48	0,68
S3	105/4	0,55	0,55	0,30	0,27
S4	105/4	0,55	0,55	0,25	0,16
S10	105/9(105)/9	9,04	9,02	2,08	2,28
S9	105/9(105)/50	48,42	48,49	34,25	26,06
S11	105/9(105)/62,5	53,48	53,51	47,60	41,61
S12	105/taper(105→62,5)/62,5/taper(62,5→50)/50/9	2,03	1,69	1,77	1,40
S15	105/taper(105 → 62,5)/50	40,64	40,74	51,40	51,28
S16	105/taper(105 → 50)/50	48,34	48,41	52,96	53,44

5.4 Měření vláknových součástek pro efektivější přenos optické energie)

Na základě měření, popisovaných v předchozích kapitolách 5.2 a 5.3, byly vybrány vzorky, které mohou pomoci zvýšit účinnost optické vazby mezi vlákny s rozdílnými průměry jader a vidových polí. Především je zde uvažován případ vazby optického záření z vlákna o větším průměru jádra do vlákna s menším průměrem jádra.

Jako první jsem provedl měření, při kterém byl využit výkonný deseti-wattový laser, který byl zkonstruován v rámci disertační práce ing. Petra Martinka. Jako další optický zdroj byl použit polovodičový laser SAFIBRA,

s.r.o. OFLS-6K-PLM. Oba tyto lasery pracují na vlnové délce 976 nm. Při měření bylo v obou případech na výstup laseru připojeno vlákno FG105LCA, které jsem považoval za referenční. Druhý konec referenčního vlákna byl připojen na měřicí detektor. Měření využívající laser s maximálním výkonem 10 W využívala pro měření optického výkonu detektor S415C. Měření využívající laser SAFIBRA, s.r.o popisovaná v této podkapitole využívala detektor S155C. Volba měřicího detektoru byla dána výší maximálního výstupního optického výkonu laserového zdroje. Laser SAFIBRA byl v těchto měření provozován v režimu P₂, což odpovídá výstupnímu výkonu ~6 mW (měřeno na výstupu referenčního vlákna FG105LCA dlouhého 1 m). Na desetiwattový laser byl připojen detektor S415C a podle hodnot zobrazených na řídicí konzoli PM200 byl nastaven výkon 50 ± 2 mW.

V dalším kroku byla pomocí konektorových spojek FC/PC připojována další vlákna. Byl také zkoumán vliv navazovaných vláken. Proto byla vícevidová vlákna standardu OM1 a OM2 měřena ve dvou provedeních a to s délkou vláken 2 a 500 metrů. Bylo také měřeno vlákno s dvojitým pláštěm DCF13, připojované jako samostatný metrový úsek nebo jako součást vzorků S9 (FG105LCA/DCF13/OM2 9 μ m) nebo S11 (FG105LCA/DCF13/OM1). Bylo také ověřeno napojení vlákna SMF-28 (9 μ m) a to jak přímo na referenční vlákno tak při vložení vzorku S11 (FG105LCE/DCF13/OM1).

Ukázalo se že detektor S415C má na daném výkonovém rozsahu neakceptovatelnou chybu měření. Ačkoliv prodejce Thorlabs deklaruje chybu měření detektoru při vlnové délce do 7 % jsou hodnoty naměřené tímto detektorem značně odlišné. Přestože výrobce neudává odchylku měření v rámci použitého rozsahu, předpokládám, že k zvětšení chyby měření došlo také tím, že jsem se u detektoru pohyboval na spodním okraji nejnižšího možného rozsahu tohoto detektoru. Proto nebyla provedena v rámci deseti-wattového laseru všechna měření a hodnoty získané detektorem S415C byly pro toto měření vyloučeny. Měření bylo dále prováděno pouze na laseru SAFIBRA, s.r.o., jehož výkon je při zapojení interním útlumovém článku P₂ dostatečně nízký, tak by nehrozilo poškození použitých detektorů S151C a S155C maximální měřený výkon ($P_{\max} = 20$ mW).

Hodnoty uvedené v tabulce 5.11 jsou naměřené při použití laseru SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6K-PLM pracujícího na vlnové délce 976 nm. Na stránkách prodejce Thorlabs jsou uvedeny maximální chyby měření detektoru S151C a S155C. Pro rozsah vlnových délek 440-980 nm u detektoru S151C je udávána chyba měření ± 3 %, pro rozsah vlnových délek 981-1100 nm je uvedena chyba měření ± 7 %. Jelikož nelze předpokládat skokovou změnu přesnosti měření při měření na pomezí těchto dvou intervalů, zvolil jsem jako nejistotu měření ± 5 % z naměřené hodnoty. Pro detektor S155C pro celý interval měřených vlnových délek je udávána přesnost měření (800-1700 nm) ± 5 % z naměřené hodnoty. Nejistota měření 5% z naměřené hodnoty znamená $\sim \pm 0,2$ dB pro naměřený výkon uváděný v dB a 0,1 až 0,2 mW pro výkony uváděné v tabulce 5.11 v mW. Pokud budu předpokládat ztráty na konektorech $\sim 0,5$ dB mohu prohlásit, že opakovaně naměřené hodnoty jsou stále v tolerovaném rozsahu. Výjimkou je jen vzorek FG105LCA+vzorek S9

(FG105LCA/DCF13/OM2)+OM2 (500 m), kdy je rozdíl naměřených hodnot 1,6 dB, což je více, než je tolerovaná odchylka měření. Větší odchylka mohla být působena makroohyby, popřípadě nedostatečně očištěným konektorem.

Během měření také bylo provedeno pokusné měření detektoru S415C. Ačkoliv opakovaná měření při použití detektoru S415C vykazovala shodné hodnoty, od měření pomocí detektoru S151C a S155C se ve všech případech lišily o více jak 1,6 dB. Měření na detektoru S415C z důvodu velké odchylky naměřených hodnot proti detektorům S155C a S151C proto nepovažuji v této části měření za směrodatné. Vzhledem i zásadním odchylkám i v předchozích měření by bylo vhodné před dalším měřením detektor opět nechat zkalibrovat. Jelikož již na počátku tohoto měření byla zjištěna zásadní odchylka v měřených hodnotách měření s detektorem S415C nebylo dokončeno a není ani udáváno v tabulce.

Tabulka 5.11 ukazuje, že vliv vlákna DCF13 je minimální resp. je srovnatelný s chybou měření. Dokonce se zdá, že v některých případech došlo při použití vlákna DCF13 k nárůstu útlumu. Dále z těchto hodnot vyplývá, že spojení pomocí konektorů dosahuje lepší efektivity přenosu signálu, než v případě svaru. To je pravděpodobně způsobeno nedostatečnou optimalizací parametrů svařování pro spoje s vlákny DCF13. Hodnoty pro sestavy, kdy k referenčnímu vláknu byl pouze připojen pomocí konektoru FC/PC, vzorek S9 (FG105LCA/DCF13/OM2), S11 (FG105LCA/DCF13/OM1), vlákno OM1 nebo OM2, odpovídají naměřeným hodnotám ze staršího měření, kdy byl použit laser SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) při výkonovém režimu (P_2). U vzorků, kdy je na referenční vlákno napojeno jednovidové vlákno SMF-28 pomocí konektoru FC/PC je rozdíl mezi naměřenými hodnotami 1 dB a u vzorku, kdy jsou pomocí těchto konektorů připojena k referenčnímu vláknu vlákna DCF13 a OM2 je pak naměřený rozdíl 1,2 dB. Rozdíl může být způsoben odlišným rozložením vybuzených vidů, jejich vzájemným přeléváním a určitými makroohyby. Příklad, kdy k referenčnímu vláknu je připojeno vlákno DCF13 a OM1 se výsledek liší o ~ 3 dB a nelze jej tedy považovat za směrodatný. Odlišné hodnoty jsou pravděpodobně opět způsobeny makroohyby a nestabilitou vícevidových vláken v čase, nedostatečným očištěním konektoru nebo nezjištěným stresováním vlákna či makroohyby.

Z výsledků v tabulkách 5.7, 5.8 a 5.9 v kapitole 5.3 vyplývá, že vzorek S2 (FG105LCA/OM2) resp. vzorek S7 (FG105LCA/OM1) vykazuje vyšší útlum, než vzorek S8 (FG105LCA/OM2) resp. vzorek S6 (FG105LCA/OM1). Z tohoto důvodu byly vzorky S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) opětovně ve svaru rozstříženy, oddělené konce zalomeny a opětovně svařeny.

Z naměřených hodnot u vzorků využívajících rozdílných délkách optického vlákna OM2 uvedených v tabulce 5.11 jsem určil měrný útlum použitých OM2 vláken.

Z rozdílu naměřených hodnot u vzorků s odlišnými délkami vláken OM1 a OM2, které jsou uvedené v tabulce 5.11 jsem vypočítal měrný útlum vláken OM1 a OM2. Protože se hodnoty v závislosti na použitém detektoru lišily, výpočet optického měrného útlumu byl určen z hodnot obou detektorů. Vypočtený měrný útlum udává tabulka 5.12. Dle transmisních spekter, které

prodejce Thorlabs uvádí na svých webových stránkách je typický optický měrný útlum pro vlákno OM1 $\sim 1,7$ dB a pro vlákno OM2 1,2 dB. Vypočtené měrné útlumy byly tedy o 0,5 resp. o 0,9 dB u vlákna OM1 větší. U vlákna pak dokonce o 2,2 resp. o 2,6 dB u vlákna OM2. Vyšší měrný útlum je pravděpodobně způsoben konektory, kterými je vlákno OM1 nebo OM2 propojeno s referenčním vláknem FG105LCA a měřícím detektorem. V případě vlákna OM2 došlo pravděpodobně ke špatnému vybuzení vlákna (znečištěné čelo vlákna nebo špatné zarovnání v konektorových propojkách).

Tabulka 5.11: Výstupní výkony vzorků tvořených kombinací vláken propojovaných pomocí konektorů FC/PC. Jako zdroj optického záření byl použit laser SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm). Vlákno FG105LCA je používáno jako referenční a jeho délka je deset metrů. (Znak „+“ značí konektorový spoj FC/PC. Vzorek S9 svar vláken FG105LCA/DCF13/OM2 a vzorek S11 je svar vláken FG105LCA/DCF13/OM1).

Použitý detektor Vzorky	S151C		S155C	
	mW	dB	mW	dB
Ref. (10 m)	7,9	-	6,0	-
Ref. + OM2 (2 m)	2,3±0,1	-5,3±0,2	1,5±0,1	-6,1±0,2
Ref. + OM2 (500 m)	1,6±0,1	-7,0±0,2	0,9	-8,0±0,2
Ref. + DCF13 (1 m) + OM2 (2 m)	2,1±0,1	-5,8±0,2	1,4±0,1	-6,3±0,2
Ref. + DCF13 (1 m) + OM2 (500 m)	1,5±0,1	-7,5±0,2	0,9	-8,0±0,2
Ref. + vzorek S9	1,8±0,1	-6,4±0,2	1,2±0,1	-6,8±0,2
Ref. + vzorek S9 + OM2 (2 m)	1,7±0,1	-6,7±0,2	1,2±0,1	-7,0±0,2
Ref. + vzorek S9 + OM2 (500 m)	0,7	-10,5±0,2	0,8	-8,9±0,2
Ref. + OM1 (2 m)	3,8±0,2	-3,2±0,2	3,1±0,2	-2,9±0,2
Ref. + OM1 (500 m)	3,0±0,1	-4,3±0,2	2,3±0,1	-4,2±0,2
Ref. + DCF13 (1 m) + OM1 (2 m)	2,9±0,1	-4,4±0,2	2,7±0,1	-3,5±0,2
Ref. + DCF13 (1 m) + OM1 (500 m)	2,4±0,1	-5,2±0,2	2,1±0,1	-4,7±0,2
Ref. + vzorek S11	2,5±0,1	-4,9±0,2	2,4±0,1	-4,0±0,2
Ref. + vzorek S11 + OM1 (2 m)	2,5±0,1	-4,9±0,2	2,3±0,1	-4,1±0,2
Ref. + vzorek S11 + OM1 (500 m)	1,9±0,1	-6,2±0,2	1,7±0,1	-5,6±0,2
Ref. + vzorek S11 + SMF (9 μ m)	0,046	-22,3±0,2	0,03	-23,0±0,2
Ref. + SMF (9 μ m)	0,055	-21,6±0,2	0,01	-27,8±0,2
Ref. + vzorek S9 + SMF (9 μ m)	0,052±0,1	-21,8±0,2	0,03	-23,0±0,2

Tabulka 5.12: Vypočtený měrný útlum α u vláken OM1 a OM2 při vlnové délce 980 nm.

Měrný útlum $\alpha(\lambda)$	Použitý detektor		
	Vlákno	S151C	S155C
α_{OM1}	2,2 dB/km	2,6 dB/km	
α_{OM2}	1,4 dB/km	3,8 dB/km	

Vzorky S2 (FG105LCA/OM2), S7 (FG105LCA/OM1) společně se vzorkem S12 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5)/OM1/taper(62,5 \rightarrow 50 μ m)/OM2/SMF 9 μ m) byly pomocí rozbočnice OPTOKON, a.s. SFM5 - S85 / 13 - 01 x 04 25 - CM3 - PC - PC připojeny k čtyřkanálovému měřiči výkonu, kde na jeden kanál bylo připojeno referenční vlákno a na zbylé vstupy tak zmíněné tři vzorky. Robočnice má dělicí poměr 1:4 a výstupní i vstupní vlákno o průměru jádra 50 μ m. Měřič výkonu je součástí zařízení OPTOKON OFT4212. Toto zařízení krom měřiče výkonu obsahuje výstup, který je pomocí optického MEMS, přepínače připojen na tři lasery pracující na vlnových délkách 850, 980, 1300 nm. Před vlastním měřením byla během zahřívání přístroje několikrát spuštěná kalibrace měřících kanálů. Přibližně po 20 minutách bylo mezi jednotlivé výstupy rozbočnice připojeno referenční FG105LCA vlákno s ostatními vzorky (S2 (FG105LCA/OM2), S7 (FG105LCA/OM1), S12 (FG105LCA/OM1/OM2/SMF 9 μ m s taperovými přechod). Změřené hodnoty byly zprůměrovány a byla určena statistická směrodatná nejistota u_a (Typ „A“), nejistota měření přístroje u_b a kombinovaná standardní nejistota u_c . Definice nejistot u_a a u_c jsou uvedeny v příloze A.1. Nejistota u_b je výrobcem udána jako 5 % naměřené hodnoty. Naměřené hodnoty společně se kombinovanou standardní nejistotou u_c jsou uvedeny v tabulce 5.13.

Tabulka 5.13: Naměřené hodnoty a jejich kombinované standardní nejistoty u_c získané měřením na zařízení OPTOKON, a.s. OFT-4212. (Šipka značí taperový přechod z průměru jádra optického vlákna před šipkou na průměr jádra za šipkou).

	λ (nm)	850	980	1300
Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μ m)	P (dB)	P (dB)	P (dB)
S7	105/62,5	-4,50 \pm 0,11	-4,02 \pm 0,10	-4,02 \pm 0,10
S2	105/50	-6,52 \pm 0,13	-5,91 \pm 0,13	-6,50 \pm 0,13
S12	105/taper(105 \rightarrow 62,5)/62,5/taper(62,5 \rightarrow 50)/50/9	-21,97 \pm 0,25	-21,35 \pm 0,24	-23,40 \pm 0,23

V tabulce 5.13 jsou uvedeny vypočtené hodnoty a jejich celkové nejistoty získané z naměřených hodnot na jednotlivých vstupech čtyřkanálového vláknového testovacího systému OPTOKON, a.s. OFT-4212. Výrobcem udávaná nejistota měření u měřičí části čtyřkanálového vláknového testovacího systému OPTOKON, a.s. OFT-4212 je \pm 5 %.

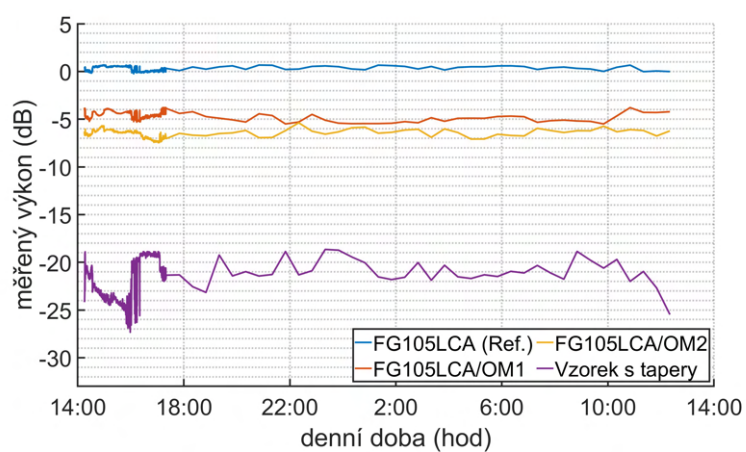
Kromě případu vzorku S2 (FG105LCA/OM2) při $\lambda = 850$ nm, kdy je vypočtená nejistota $u_a = \pm 0,02$ dB (definice u_a je uvedena v příloze A.1) jsou standardní nejistoty u_a pro vzorky S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) uvedené v tabulce 5.13 stejné ($\pm 0,01$ dB). U vzorku S12 (FG105LCA/OM1/OM2/SMF 9 μm s teperovými přechody) je pak nejistota u_a pro $\lambda = 850$ nm 0,25 dB, pro $\lambda = 980$ nm 0,24 dB a pro $\lambda = 1300$ nm 0,23 dB.

Z tabulky 5.13 je patrné, že všechny vzorky vykazují nejnižší útlum na vlnové délce 980 nm. Vzorek S12 (FG105LCA/OM1/OM2/SMF 9 μm s taperovými přechody) vykazuje nejvyšší útlum na $\lambda = 1300$ nm. U vzorků S2 (FG105LCA/OM2) se výkony liší o 0,6 dB. U vzorku S7 (FG105LCA/OM1) jsou útlumy na 980 a 1300 nm obdobné, a rozdíly mezi nimi jsou dokonce nižší, než je samotná nejistota měření. Vzorky S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) naopak vykazují nejvyšší útlum na vlnové délce 850 nm, i když u vzorku S2 (FG105LCA/OM2) je rozdíl opět menší, než nejistota měření. Změna charakteru závislosti na vlnové délce u vzorku S12 (FG105LCA/OM1/OM2/SMF 9 μm s taperovými přechody) je nejspíše dána tím, že koncovým vláknem je vlákno SMF-28 (s průměrem jádra 9 μm).

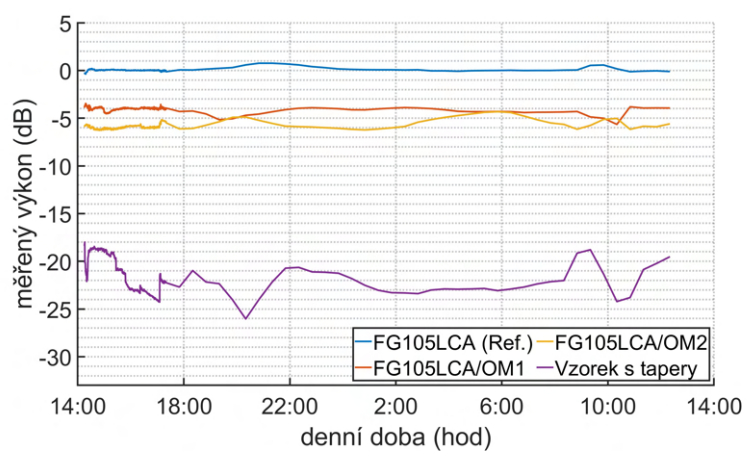
Měření účinnosti vazby v závislosti na čase, tedy její časové stability, je uvedeno na obrázcích 5.18(a), 5.18(b) a 5.18(c).

Z obrázků 5.18(a), 5.18(b) a 5.18(c) vyplývá, že ze všech vzorků měl dle očekávání nejnižší účinnost vazby vzorek S12 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5)/OM1/taper(62,5 \rightarrow 50 μm)/OM2/SMF 9 μm) tj. vzorek využívající taperovaných přechodů zakončený vláknem SMF 9 μm . Důvodem poměrně vysokých útlumů \sim -22 dB je fakt, že na měřeném konci je navařeno vlákno SMF-28 (s jádrem 9 μm) a jde tak o vzorek s nejvyšším rozdílem průměrů vstupního a výstupního jádra. Měření toto vzorku je také nejvíce zatížené chybou měření. Důvodem jsou opět nízké výstupní výkony, které jsou více ovlivněny šumem použitého detektoru pro měření výkonu. Z tohoto důvodu jsou vyšší nejen nejistoty v tabulce 5.13, ale dochází také k většímu zvlnění průběhu (fialový průběh). Také vzorky S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM2 resp. FG105LCA/OM1). Vykazují výkony dle očekávání. Nižší útlum vykazuje vzorek zakončený vláknem OM1, který má oproti vzorku zakončenému OM2 nižší rozdíl průměrů jader svařovaných vláken.

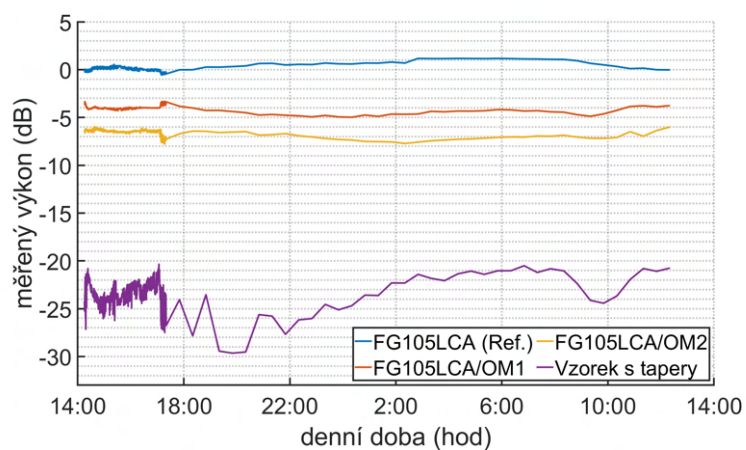
V tabulce 5.14 jsou zaznamenány naměřené hodnoty naměřené zařízením OFT4212 pro vzorky S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) před úpravou a po úpravě. Je zřejmé, že u vzorku S7 (FG105LCA/OM1) došlo k výraznému zlepšení účinnosti přenosu. Rozdíl výkonových úrovní oproti předchozímu stavu je taktéž zaznamenán v tabulce 5.14. Vzorek S2 (FG105LCA/OM2) po opětovném navaření vykazoval vyšší útlum o 0,6 dB pro $\lambda = 850$ nm. Při $\lambda = 980$ nm došlo o zlepšení přenosu energie o 0,8 dB. Srovnatelný výstupní výkon oproti vzorku S8 (FG105LCA/OM2), který využívá stejné kombinace vláken (FG105LCA/OM2) jako vzorek S2 se projevil pouze na $\lambda = 980$ nm. Na $\lambda = 850$ nm došlo naopak k zvýšení útlumu oproti předchozímu stavu.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 5.18: Útlum jednotlivých vzorků při vlnových délkách a) 850 nm, b) 980 nm, c) 1300 nm v závislosti na čase.

Po opětovném navaření vzorku S7 (FG105LCA/OM1) byla účinnost vazby o 0,1 dB pro vlnovou délku 850 nm vyšší, než u vzorku S6 (FG105LCA/OM1), který využívá stejnou kombinaci vláken. Pro vlnovou délku 980 nm pak byla účinnost vazby oproti vzorku S6 (FG105LCA/OM1) vyšší o 0,3 dB. Opětovné svaření vláken u vzorků S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) bylo docíleno v případě vzorku S7 (FG105LCA/OM1) výrazného zlepšení oproti předchozímu stavu (viz poslední řádek posledních dvou sloupců v tabulce 5.14).

U vzorku S2 (FG105LCA/OM2) je pak stav po opětovném navaření srovnatelný s předchozí účinností vazby. Nejistota měření u_b daná relativní nejistotou měřící části ($\pm 5\%$) je pro naměřené hodnoty u vzorku S2 (FG105LCA/OM2) $\sim \pm 0,3$ dB. Pro vzorek S7 (FG105LCA/OM1) pak $\sim \pm 0,2$ dB. Pokud navíc připočtu uvažované maximální ztráty na konektoru 0,5 dB získám interval, ve kterém naměřené hodnoty vzorku S2 (FG105LCA/OM2) leží. Výsledný útlum vzorku S7 (FG105LCA/OM1) byl nakonec nižší, než v případě vzorků S6 (FG105LCA/OM1). V případě vzorku S2 (FG105LCA/OM2) nedošlo ani po úpravě k výraznému zlepšení přenosových vlastností. Oproti předchozímu stavu došlo k poklesu přenášené úrovně výkonu o 0,6 dB pro $\lambda = 850$ nm resp. navýšení o 0,8 dB pro $\lambda = 980$ nm. V případě vzorku S7 (FG105LCA/OM1) došlo k navýšení přenášené úrovně výkonu o 2,2 dB pro $\lambda = 850$ nm resp. o 3,0 dB pro $\lambda = 980$ nm.

Tabulka 5.14: Porovnání útlumů vzorků S2 (FG105LCA/OM2) a S7 (FG105LCA/OM1) před opětovným svařením a po opětovném svaření.

Vzorek	Starý svar (dB)		Nový svar (dB)		Rozdíl účinností vazby starého a nového svaru (dB)	
	850	980	850	980	850	980
	Vlnová délka (nm)					
FG105LCA/OM2 (vz. S2)	-5,9	-6,7	-6,5	-5,9	-0,6	0,8
FG105LCA/OM1 (vz. S7)	-6,7	-7,0	-4,5	-4,0	2,2	3,0

Lze také zpozorovat, že v průběhu času dochází na vlnové délce 850 nm výraznějším výkyvům v přenášené úrovni výkonu oproti měřením na vlnových délkách 980 a 1300 nm. Tento efekt přisuzuji vlastnostem použitého polovodičového laseru, jenž je součástí zařízení OFT4212. Výkyvy výstupního optického výkonu laseru jsou pravděpodobně způsobeny změnami teploty během měření. Dále byly porovnány výkony vždy téhož vzorku, při různých vlnových délkách (850, 980, 1300 nm). Tyto průběhy se v průběhu měření navzájem protínaly, z čehož lze usoudit, že vliv vnějšího prostředí v laboratoři a stabilita laserů způsobuje větší rozdíl v naměřených hodnotách, než je rozdíl výkonových úrovní mezi jednotlivými používanými lasery. Průběhy každého

jednotlivého vzorku B.9 B.8 B.10, při různých vlnových délkách jsou uvedeny v příloze B.5.

■ Měření vzorků využívajících taperovaných přechodů

Pomocí zařízení VytranTM byly vytvořeny vzorky využívající taperových přechodů. Vzorky jsem označil číslem S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/OM1/OM2). U vzorku S12 (FG105LCA/OM1/OM2/SMF 9 μm s taperovými přechody) se ukázalo, že při navazování optického záření z vlákna s velkým průměrem jádra (105 μm) do vlákna s podstatně menším průměrem jádra (9 μm) je problematické i za použití vláknových taperů. Ačkoliv optimalizace je stále možná, během provádění experimentů se nepovedlo pro takto veliké kontrasty průměrů jader optických vláken dosáhnout dostatečné účinnosti spojení, oproti případu přímého napojení. Navíc zde dochází k značným ztrátám (~ -22 dB).

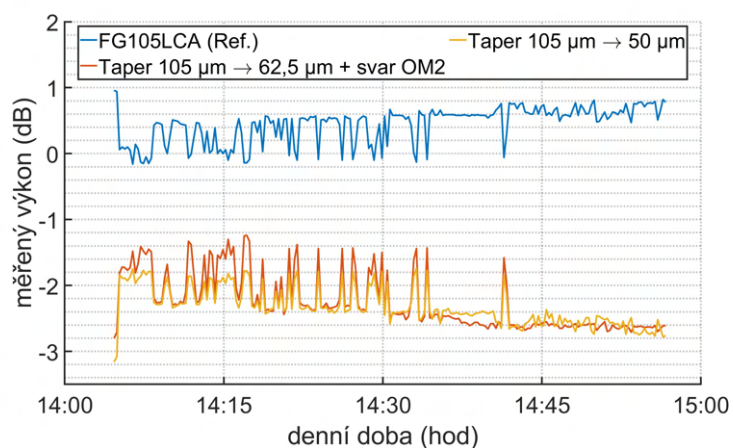
Při výrobě vzorků S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2) byla místo snahy o navázání signálu do SMF vlákna snaha vytvořit vzorek s co možná nejvyšší účinností navázání optického záření z vlákna FG105LCA do vlákna OM2. U vzorku S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) je jako vstupní vlákno FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť). Na tomto vláknu je vytvořen taperový přechod, na jehož užším konci je průměr jádro/plášť 62,5/74 μm. Na užší konec je poté navařeno vlákno OM2, jehož průměr jádra je 50 μm. Mezi špičkou taperu a navařeným vláknem OM2 tak vzniká obdobný přechod, jako při přímém spojení vláken OM1 a OM2.

Vzorek S16 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) využívá taperového přechodu, který je vytvořen z vlákna FG105LCA. V tomto případě je vlákno taperováno na průměr jádra 50 μm, což odpovídá standardu OM2. Průměr pláště na špičce taperu je přibližně 59 μm.

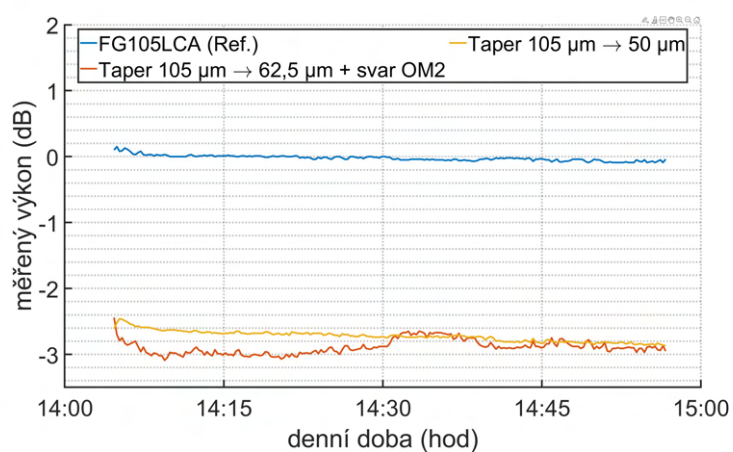
Vzorek S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2) byly připojeny k měřicímu přístroji OPTOKON, a.s. OFT-4212. Na měřicí vstup A bylo připojeno referenční vlákno FG105LCA na vstup B byl připojen vzorek S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) a na vstup C vzorek S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2). Naměřené výkonové úrovně jsou vyneseny v grafech na obrázku 5.19.

Z výsledných grafů na obrázku 5.19 a tabulky 5.15 vyplývá, že nejnižší útlum obou vzorků je na vlnové délce 850 nm. Což je v rozporu s mým očekáváním, neboť dle transmisních spekter vláken použitých ve vzorcích S15 (FG105LCA/OM1/OM2 s taperovými přechody) a S16 (FG105LCA/OM1/OM2 s taperovými přechody), které prodejce Thorlabs, Inc. poskytuje na svých webových stránkách, jsem očekával nejnižší útlum na vlnové délce 1300 nm resp. nejvyšší na vlnové délce 850 nm. Částečným vysvětlením může být nižší stabilita laseru pracujícího na 850 nm, která je patrná i na výstupu referenčního vlákna FG105LCA na obrázku 5.19(a), projevující se zvlněním křivky. Mohlo s také jednat o špatnou systémovou kalibraci měřící části pro vlnovou délku $\lambda = 850$ nm.

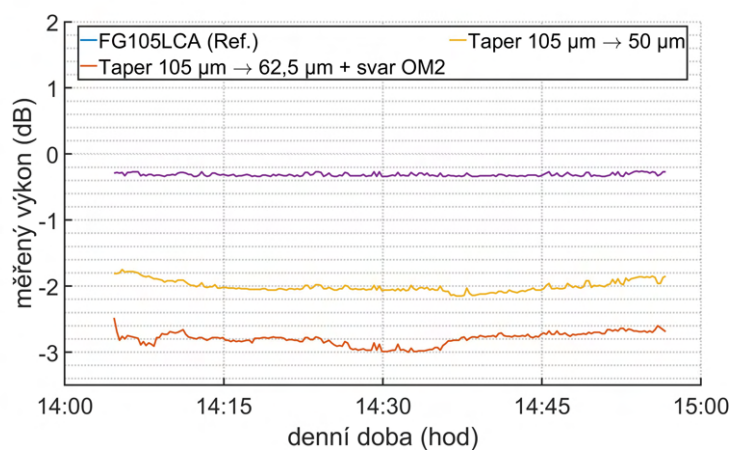
5.4. Měření vláknových součástek pro efektivnější přenos optické energie)



(a)



(b)



(c)

Obrázek 5.19: Naměřená výkonová úroveň pro vzorky S15 (FG105LCA/taper(105 → 62,5 μm)/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2) pro vlnovou délku a) 850 nm, b) 980 nm, c) 1300 nm.

Naměření hodnoty může také ovlivňovat použitá rozbočnice OPTOKON, a.s. SFM5 - S85 / 13 - 01 x 04 25 - CM3 - PC - PC, která byla připojena k měřicímu přístroji OPTOKON, a.s. OFT 4212. Použitá rozbočnice však nebyla měřena z hlediska transmisního spektra a nezle tedy s jistotou říct, do jaké míry rozbočnice ovlivňuje naměřené hodnoty. Pro vlnové délky 850 a 980 nm jsou výkonové hladiny naměřené u obou vzorků srovnatelné resp. rozdíl naměřených nejistot je obvykle menší, než je samotná nejistota měření. Pro vlnovou délku 850 nm je rozdíl naměřených středních hodnot výkonu 0,05 dB resp. 0,16 dB pro $\lambda = 980$ nm. Výraznější rozdíl nastává až v případě vlnové délky $\lambda = 1300$ nm, kdy rozdíl naměřených středních hodnot je 0,8 dB. Tento rozdíl je dobře viditelný na obrázku 5.19(c), kde se průběhy úrovně hladin zkoumaných vzorků na rozdíl od průběhů na obrázcích 5.19(a) a 5.19(b) po dobu měření neprotínají. Následující tabulka 5.15 uvádí střední hodnotu s kombinovanou nejistotou u_c . Definici kombinované nejistoty u_c je možné nalézt v příloze A.1.

Tabulka 5.15: Naměřené úrovně výkonu na měřící části zařízení OPTOKON, a.s. OFT-4212. Zkoumány jsou vzorky využívajících taperových přechodů a kombinaci vláken FG105LCA/OM1/OM2.

λ (nm)	Vzorek S15 (dB)	Vzorek S16 (dB)
850	$-2,58 \pm 0,13$	$-2,65 \pm 0,13$
980	$-2,89 \pm 0,14$	$-2,73 \pm 0,14$
1300	$-2,80 \pm 0,14$	$-2,00 \pm 0,10$

Následující tabulka 5.16 porovnává účinnost jednotlivých metod vazeb mezi vláknem FG105LCA a vláknem standardu OM2.

Tabulka 5.16: Tabulka porovnávající způsoby vazby signálu z výchozího vlákna FG105LCA do vlákna standardu OM1 a OM2.

λ (nm)	Taperované přechody		Přímé navářky		DCF13	Kontektorované spoje	
	vz. S15	vz. S16	vz. S2	vz. S8	vz S9	Ref. +DCF13 +OM2	Ref. +OM2
850	-2,6	-2,7	-6,5	5,0	-6,4	-5,8	-4,9
980	-2,9	-2,7	5,9	-5,7	-6,8	-6,3	-6,4
1300	-2,8	-2,0	-6,7	-6,9	-5,9	-	-

Z výsledků tabulky 5.16 vyplývá, že jednoznačně nejefektivnější vazbu poskytuje použití spojů využívajících vláknových taperu. Na zkoumaných vlnových délkách zde dochází přibližně k polovičnímu útlumu oproti situaci, kdy vlákno bylo navařeno přímo. Lze také vypořadovat, že krátké úseky vlákna se dvěma plášti DCF13 nepřinášejí přinejmenším v délkách do 1 metru jednoznačné zlepšení přenosu signálu. Naměřené úrovně signálu, na vzorcích využívajících vlákno DCF13, totiž obvykle dosahovaly menších rozdílů, než je samotná nejistota měření. Malý rozdíl v naměřených hodnotách byl jak

mezi vzorky spojovanými pomocí konektorů FC/PC, tak vzorků spojovaných pomocí svaru. Je nutné dále poznamenat, že výsledná účinnost vazby je ovlivněna nastavením svařičky a z tohoto důvodu mají některé vzorky oproti předpokladu nižší útlum při využití konektorové spojky oproti spoji pomocí svaru.

Měření výkonových ztrát vzorku od společnosti MH GoPower

Pomocí testovacího zařízení OPTOKON, a.s. OFT4212 vybaveného zabudovanými polovodičovými lasery vyzařujícími na vlnových délkách 850, 980 a 1300 nm bylo postupně proměřeno 5 vybraných vzorků. Měření vzorku z důvodu potřeby vyššího počtu snímacích vstupů, než kolika je zařízení vybaveno bylo provedeno ve dvou etapách.

V první etapě byl proměřeny následující vzorky: vzorek S9 (FG105LCA/DCF13/OM2) s svařovanými spoji vzorek S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2) s taperovými přechody a vzorek K13 (FG105LCA+DCF13+OM2) konektorovanými spoji pomocí konektorů FC/PC.

Druhá etapa měření zkoumala vzorek adaptéru průměru vidového pole MFA MH GoPower 1x1MFA-D01-2-2-FC-B a vzorek S8 tj. vzorek s přímým navařením vlákna OM2 na vlákno FG105LCA. Naměřené hodnoty včetně kombinovaných nejistot jsou uvedeny v tabulce 5.17.

Tabulka 5.17: Naměřené výkony a jejich kombinované nejistoty získané pomocí testovacího zařízení OPTOKON, a.s. OFT4212.

λ (nm)	P (dB)				
	FG105LCA /DCF13/ OM2 (Vz. S9)	FG105LCA +DCF13 +OM2 (Vz. K13)	FG105LCA/ taper(105 → 50 μm)/ OM2 (Vz. S16)	MH GoPower	FG105LCA/ OM2 (Vz. S8)
850	-5,68 ± 0,57	-6,54 ± 0,65	-2,78 ± 0,28	-4,73 ± 0,48	-6,78 ± 0,62
980	-6,10 ± 0,61	-5,78 ± 0,58	-3,29 ± 0,33	-4,87 ± 0,49	-6,21 ± 0,62
1300	-6,63 ± 0,66	-6,76 ± 0,68	-3,02 ± 0,328	-5,23 ± 0,52	-7,14 ± 0,71

Z tabulky 5.17 je patrné, že téměř u všech vzorků (mimo vzorku S16) v ní uvedených dochází k mírnému nárůstu útlumu na vlnové délce 1300 nm. Povolný nárůst útlumu s rostoucí vlnovou délkou lze u vzorků S9 (FG105LCA/DCF13/OM2) a u vzorku MH GoPower. Vzorek S8 (FG105LCA/OM2) vykazuje dle očekávání nejvyšší útlum spoje v porovnání s ostatními vzorky uvedenými v tabulce 5.17 na všech vlnových délkách. Vzorek S16 (FG105LCA/taper (105 → 50 μm)/OM2) vykazuje nejnižší útlum -2,78 ± 0,28 dB při λ = 850 nm. Naopak nejvyšší útlum -3,29 ± 0,33 dB vykazuje při vlnové délce 980 nm. Vzorek 16 (FG105LCA/taper (105 → 50 μm)/OM2) tak představuje vzorek s nejvyšší efektivitou přenosu energie z vlákna s průměrem jádra 105 μm

a skokovou změnou indexu lomu do vlákna s průměrem jádra $50\ \mu\text{m}$ s gradientním profilem indexu lomu. Druhým vzorkem s nejlepšími výsledky (nejnižším útlumem) byl vzorek od MH GoPower. Oproti vzorku S16 je přenášený výkon o 1,95 dB nižší při $\lambda = 850\ \text{nm}$. Při $\lambda = 980\ \text{nm}$ je přenášený výkon nižší o 1,58 dB a na vlnové délce 1300 nm je útlum -2,21 dB oproti vzorku 16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm)/OM2). Naměřená hodnota útlumu u vzorku MH GoPower je na vlnové délce 1300 nm vyšší, než je maximální výrobcem uváděná hodnota vložných ztrát. Výrobce udává maximální vložnou ztrátu 5 dB. Naměření vyšších vložných ztrát může být nicméně způsobeno konektory (až 0,5 dB), kterými je vzorek připojen ke zbytku optické trasy. Z hodnot kombinovaných nejistot je také patrné, že nejistota měření je větší, než rozdíl mezi naměřenou a maximální deklarovanou hodnotou. Vyšší naměřené útlumy na spektrálním analyzátoru ~ -7 až $-7,5$ dB mohou být opět způsobeny vlivem konektoru. Navíc zde hraje roli to, že analyzátor předpokládá připojení gradientního optického vlákna, ale výstupní vlákno vzorku MH GoPower má skokovou změnu indexu lomu.

Toto měření také mluví ve prospěch použití DCF vláken. Oba vzorky (S9 a K13) s DCF využívají kombinace vláken FG105LCA/DCF/OM2. Vzorek S9 jednotlivá propojení řeší pomocí svaru (druhý sloupec zleva). Vzorek K13 využívá k propojení vláken konektorů FC/PC. Nutno však poznamenat, že pouze hodnota naměřená na $\lambda = 850\ \text{nm}$ u vzorku S9 má výrazněji nižší hodnotu. V odstaních případech jsou rozdíly úrovně výkonu menší, než je kombinovaná nejistota měření. Dle očekávání nejnižší efektivitu přenosu měl vzorek S8, kdy je vlákno FG105LCA pomocí svaru spojeno s vláknem OM2. Varianta, kdy byla stejná kombinace vláken (FG105LCA a OM2) připojená pomocí konektorů nebyla v rámci tohoto měření uvažována.

■ Konektor OZ Optics

Účinnost čočkového konektoru byla měřena v několika kombinacích. První využívá vstupního vlákna s průměrem 100/140 μm (jádro/plášť), pro které je konektor optimalizován. V druhém případě je jako vstupní předřazeno vlákno FG105LCA. Na výstup konektoru bylo postupně připojeno vlákno OM2, FG050LGA a vlákno Molex s průměrem vlákna 50/70 μm (jádro/plášť). Zdrojem optického záření byl laser SAFIBRA, s.r.o OFLS-6K PLM s vyzařovanou vlnovou délkou 976 nm. Jako výstupní vlákno z laseru bylo použito jednovidové vlákno SM1G657A1, na které pak bylo přes konektorovou spojku připojeno vlákno Molex 100/140 nebo vlákno FG105LCA. Pro měření při nastaveném výkonovém režimu P_2 byl použit detektor S151C. Pro režimy P_1 , P_0 pak detektor S415C. Základní vlastnosti detektorů a popis výkonových režimů zdrojů SAFIBRA, s.r.o. jsou uvedeny v kapitole 4.1.

Jak vyplývá z tabulky 5.18 výkonový rozdíl mezi variantami se vstupním vláknem FG105LCA a vláknem Molex 100/140, pro které je čočkový konektor optimalizován, není příliš výrazný. Rozdíly mezi jednotlivými hodnotami jsou ve většině případů menší, než je nejistota měření způsobená chybou detektoru S151C (3 %) a S415C (5 %). Ve zbylých případech je výsledek pravděpodobně

ovlivněn vlivem konektorové spojky (s uvažovaným maximálním útlumem 0,5 dB). Přesto se zdá, že u většiny zapojení s vláknem Molex 100/140 dosahovaly sestavy vyšší účinnosti vazby a to o 0,2-0,5 dB oproti sestavám se vstupním vláknem FG105LCA.

Tabulka 5.18: Vložné ztráty vzorků spojovaných pomocí čočkového konektoru OZ Optics. Zdrojem záření byl laser SAFIBRA s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm). (Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou výkonové režimy laseru SAFIBRA, s.r.o popsané v kapitole 4.1. Čočkový konektor je v tabulce značen (č. k.)).

Číslo vzorku	Typy vláken a průměry vláken (μm)	P_2 (dB)	P_1 (dB)	P_0 (dB)
L1	Molex 100/140+(č. k.)+OM2	-15,7	-15,4	-14,0
L2	Molex 100/140+(č. k.)+FG050LGA	-1,8	-1,2	-1,2
L3	Molex 100/140+(č. k.)+Molex 50/70	-0,8	-0,9	-0,8
L4	FG105LCA+(č. k.)+OM2	-15,8	-15,5	-14,1
L5	FG105LCA+(č. k.)+FG050LGA	-1,6	-1,7	-1,7
L6	FG105LCA+(č. k.)+Molex 50/70	-1,2	-1,0	-1,0

Z tabulky 5.18 je patrné, nejvyšší výstupní výkony byly získávány u sestav, kdy na adaptér navazovalo vlákno Molex 50/70 μm . Lepší účinnost vazby je nejspíš způsobena rozdílnými poměry průměrů jádra a pláště (oproti vláknům FG050LGA) a optimalizací konektoru pro vlákna Molex. Rozdíly účinností vazby u vzorků s navazujícím vláknem Molex 50/70 μm a FG050LGA, využívajících vstupního vlákna FG105LCA (vzorky L5 a L6) byly v rozmezí 0,4-0,7 dB. U vzorků L2 a L3 se vstupním vláknem Molex 100/140 μm byl tento rozdíl stejný (0,3-1,0 dB).

Z hodnot v tabulce lze také usoudit, že napojování vláken s gradientním profilem indexu lomu na výstup adaptéru značně snižuje účinnost vazby (vzorky L1 a L4). Přenesený výkon je v případě napojení metrového úseku gradientního vlákna OM2 o 12,8-14,2 dB nižší, než při napojení vlákna Molex se stejným průměrem jádra (50 μm) a skokovou změnou indexu lomu.

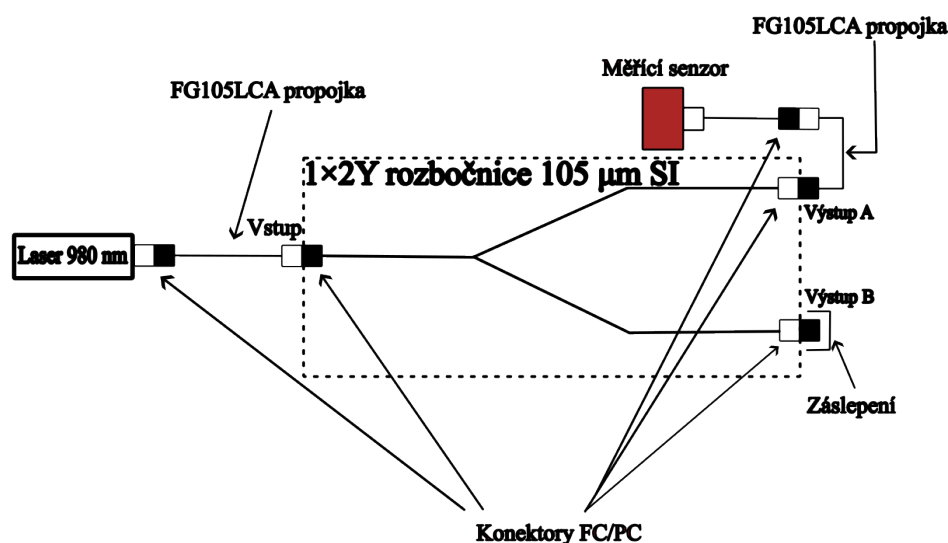
Oproti výkonu naměřenému na referenčním vlákně FG105LCA dochází při vazbě na vlákno OM2 (vzorek L4) k útlumu 14,1-15,8 dB. Při referenčním vlákně Molex 100/140 μm pak o 10-15,7 dB (vzorek L1). Nejvyšší účinnost vazby je pak při kombinaci, kdy vstupním vláknem je vlákno 100/140 μm Molex a za optickým čočkovým konektorem je napojeno vlákno Molex 50/70 μm (vzorek L3), kdy útlum oproti výkonu naměřenému na referenčním vlákně Molex 100/140 μm výkonu byl 0,8-0,9 dB.

Řešení vazby pomocí čočkového konektoru se jeví jako nejučinnější řešení vazby mezi vláknem s průměrem jádra 105 μm vláknem s průměrem jádra 50 μm . Podmínkou však je, aby navazující vlákno mělo profil se skokovou změnou indexu lomu. Pokud by bylo navazováno vlákno se stejným průměrem jádra, které má však gradientní změnu indexu lomu (např. vlákno OM2). Jeví se toto řešení jako nevhodné. Toto zapojení totiž vykazuje nižší účinnost vazby, než při přímém navaření vláken FG105LCA/OM2 (vzorek s nejnižší účinností

vazby má na stejné vlnové délce útlum 6,7 dB). Je nutné připomenout, že vzorky z tabulky 5.17 jsou zakončené právě OM2 vláknem s gradientním profilem indexu lomu. V rámci navazujících prací by bylo zajímavé ověřit, jak se změní účinnost vazby u měřených vzorků, pokud bude mít výstupní vlákno profil se skokovou změnou indexu lomu.

5.5 Měření vlastností optických součástek pro aplikaci PoF (Power over Fiber)

Tato část měření se zabývá ověřením základních vlastností dvou pasivních optických rozbočnic $1 \times 2Y$ s vlákny o průměru $105 \mu\text{m}$. V následujícím měření byla změřena spektrální charakteristika jednoduchého systému WDM (WDM – Wavelength Division Multiplex). WDM systémy jsou jedním z klíčových prvků u systémů PoF. Rozbočnice nebo jednoduché systémy WDM jsou nedílnou součástí u systémů, kdy je optická energie přenášena společně s daty po společném optickém vlákně a to i v případě, že se jedná pouze o jednoduchou topologii sítě (minimální větvení popřípadě pouze přímé propojení blízkého řídicího a vzdáleného zařízení. V další části je pak zkoumán prototyp otočného konektoru SPINNER Single Channel FORJ 1.068. Schématický náčrt rozbočnice je uveden na Obrázku 5.20.



Obrázek 5.20: Schéma optické rozbočnice $1 \times 2Y$ s označeným vstupem a dvěma výstupy A, B. Výstupy rozbočnice jsou tvořeny vlákny s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$ s $NA = 0,22$ a skokovým profilem indexu lomu.

Pro měření jsem měl k dispozici dvě optické rozbočnice $1 \times 2Y$ s výstupními vlákny o průměru jádra $105 \mu\text{m}$ a $NA = 0,22$. Výstupní vlákna rozbočnice měly skokový profil indexu lomu. Dělicí poměry rozbočnice byly 49,31:50,69 %

a 48,62:51,38 %. Rozbočnice byly optimalizovány pro vlnovou délku 975 nm. Dle dokumentace výrobce jsou pro měřené rozbočnice uvažované vložné ztráty 4 dB, útlum odrazu 40 dB a maximální výkon, který lze navázat 30 W. Jako optický zdroj byl pro účely měření použit zdroj SAFIBRA OFLS-6K PLM $\lambda = 976$ nm. Při měření byl laser provozován při výkonovém režimu $P_1 = \sim 23$ mW (~ 10 % z P_{\max}). Popis výkonových režimů laseru SAFIBRA je uveden v kapitole 4. Uvedený výkon byl naměřený na výstupu referenčního vlákna FG105LCA.

Při měření byl laser nejprve připojen na výstup $P_{\text{out}-1}$ a posléze postupně i k výstupům $P_{\text{out}-2}$ a $P_{\text{out}-3}$. Na výstup, ke kterému nebyl připojen laser, jsem připojil detektor pro měření optického výkonu. Na volný výstup byl připojen detektor, který ale nebyl připojen k řídicí konzoli a sloužil pouze pro bezpečné zaslepení vstupu/výstupu, aby se minimalizovalo riziko případného úrazu vysokým optickým výkonem.

Naměřené výstupní výkony shrnuje tabulka 5.19.

Tabulka 5.19: Výstupní výkon jednotlivých výstupů rozbočnice při různých připojeních laserového zdroje.

Směr šíření optického záření	Optický výkon (mW)	
	Rozbočnice 1	Rozbočnice 2
Vstup → Výstup „A“	3,8	3,3
Vstup → Výstup „B“	4,2	4,2
Výstup „A“ → Vstup	3,6	3,3
Výstup „B“ → Vstup	3,5	4,2
Výstup „A“ → Výstup „B“	0,049	0,049
Výstup „B“ → Výstup „A“	0,051	0,059

Z výsledků uvedených v tabulce 5.19 vyplývá, že se jedná téměř o symetrické rozbočnice s poměrem dělení přibližně 50:50 (dle dokumentace výrobce 49,31:50,69 a 48,62:51,38). Rozdílné výstupní výkony mohou být způsobeny drobnými konstrukční odchyškami. Největší vliv však budou mít konektory, kterými je rozbočnice připojena ke zdroji záření a měřicímu detektoru.

Z naměřených výsledků také vyplývá, že při šíření ze vstupů na výstupy se výkon pouze rozdělí přibližně na polovinu a v každém rameni se pak tedy šíří přibližně 50 % vstupního výkonu. V opačném směru z výstupu na vstup dochází taktéž k poklesu výkonu přibližně na polovinu. Mezi výstupy navzájem je však signál tlumen přibližně o -21,5 dB.

Dále jsem provedl měření spektrálních charakteristik jednoduchého vlnového multiplexu s označením WDM-1x1-3108-1-1-0.8-5.5-FA. Systémy WDM jsou pro systémy PoF, u kterých je přenos informace a výkonového záření šířen jedním vláknem resp. vláknem s jedním jádrem klíčový.

WDM (WDM-1x1-3108-1-1-0.8-5.5-FA) má tři vstupně výstupní kanály označené jako B_c (Black Common), W_p (White pass) a W_r (White reflection). Kanály B_c (Black Common) a W_p (White pass) jsou realizovány vláknem SMF-28e průměrem jádra 8,2 μm a s uvažovaným průměrem vidového pole (MFD) 10 μm . Kanál W_r (White reflection) je realizován SMF vláknem

HI780 s průměrem jádra 4 μm a s předpokládaným průměrem vidového pole 5 μm . Konce optických vláken jsou osazeny konektory FC/APC. Maximální výkon, se kterým lze toto WDM provozovat je 500 mW. Útlum odrazu (RL – Return Loss) měřeného WDM je dle dokumentace 48 dB (Požadováno ≥ 45). Polarizační ztráty (PDL – Polarisation Dependent Loss) jsou dle dokumentace pro tento výrobek 0,01 dB (Požadováno $\leq 0,10$ dB). Další parametry udávané v dokumentaci dodané výrobcem jsou v tabulce 5.20.

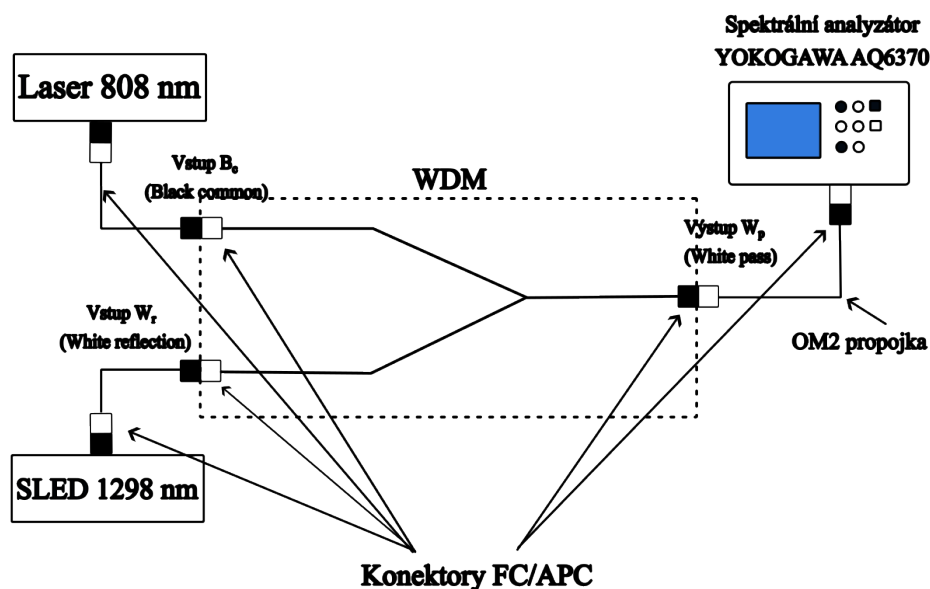
Tabulka 5.20: Parametry vstupních kanálů W_r (White reflection) a W_p (White pass) udávané v dokumentaci měřeného WDM.

Kanál W_p (White pass)		
Parametr	Požadováno	Výrobcem naměřeno
Vlnová délka určená pro kanál (nm)	1310	1310
Vložné ztráty (dB)	<1,40	0,49
Optická izolace kanálu (dB)	>25	39
Kanál W_r (White reflective)		
Vlnová délka určená pro kanál (nm)	810	810
Vložné ztráty (dB)	<1,30	1,29
Optická izolace kanálu (dB)	>13	28

Na vstup označeným jako B_c (Black Common) byl připojen laser SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6-808-250 s vlnovou délkou $\lambda = 808$ nm. Na vstup označeným jako W_r (White reflection) byl připojen zdroj s SLED SAFIBRA, s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C s vlnovou délkou $\lambda = 1298$ nm. Oba zdroje byly opticky připojeny k WDM pomocí propojek tvořených OM2 vláknem. Propojka s OM2 vláknem byla využita i k propojení výstupu WDM označeného jako W_p (White pass) a spektrálnímu analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C. Schéma zapojení WDM systému při měření jeho spektrální charakteristiky je uvedeno na obrázku 5.21 Parametry použitých zdrojů záření, jejichž výstupy byly pomocí zkoumaného WDM slučovány uvádí tabulka 5.21.

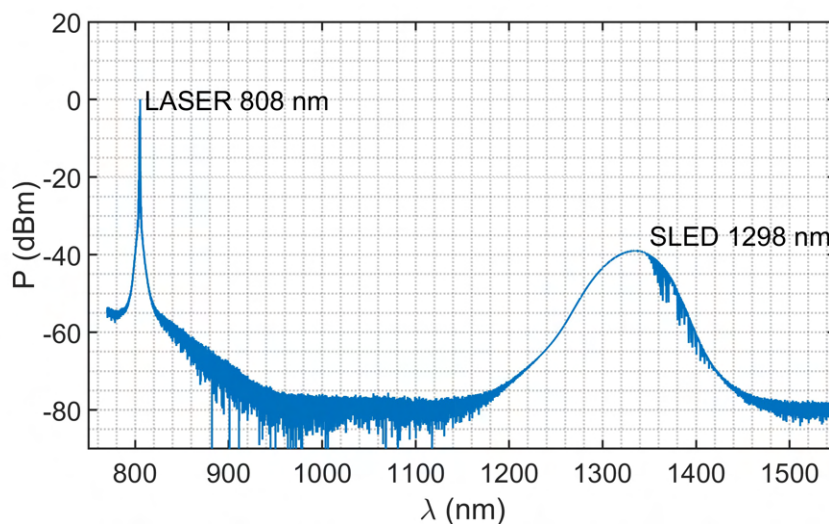
Tabulka 5.21: Naměřené výkony laserových zařízení SAFIBRA, s.r.o. Výstupní výkon laseru je volen třemi režimy – P_0 , P_1 , P_2 .

Laserová dioda		
	naměřené hodnoty	hodnoty uváděné výrobcem
λ při P_{\max} (nm)	806,5	808
Optický výkon při P_0	85,7 mW (19,32 dBm)	267,50 mW (24,27 dBm)
Optický výkon při P_1	42,8 mW (16,31 dBm)	133,96 mW (21,27 dBm)
Optický výkon při P_2	8 mW (9,03 dBm)	26,73 mW (14,27 dBm)
SLED		
λ při P_{\max} (nm)	1350	1298
Optický výkon při P_0	4,39 mW (6,42 dBm)	9,43 mW (9,74 dBm)
Optický výkon při P_1	2,73 mW (4,36 dBm)	4,72 mW (6,74 dBm)
Optický výkon při P_2	0,82 mW (-0,86 dBm)	0,94 mW (-0,26 dBm)



Obrázek 5.21: Schéma zapojení jednoduchého systému WDM slučujícího optické záření z laseru zářícího na vlnové délce 808 nm a širokospektrální SLED pracující na centrální vlnové délce 1298 nm

Spektrální charakteristika změřená pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C je uvedena na obrázku 5.22. Vzhledem tvaru naměřené spektrální charakteristiky laseru vyzařujícím na vlnové délce 808 nm usuzují, že se jedná o DBR nebo DFB laser. Šířka spektrální čáry (FWHM) je $\sim 0,1$ nm. Dále bylo zjištěno, že maximální výkon je vyzařován na kratší vlnové délce než uvádí výrobce. Maximální výkon laseru je vyzařován na vlnové délce 805,27 nm.



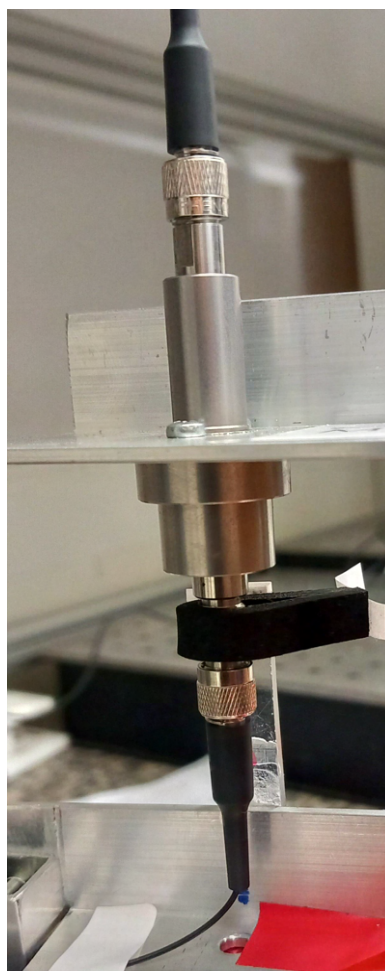
Obrázek 5.22: Spektrální charakteristika jednoduchého systému WDM připojeného na optické zdroje 808 nm a 1298 nm.

■ Otočný konektor SPINNER 105 μm

Při řešení diplomové práce jsem také provedl ověření vlastností otočného konektoru SPINNER Single-Channel FORJ 1.068. určeného pro propojení optických vláken s průměrem jádra 105 μm . Přípravek byl vyroben v rámci řešení disertační práce ing. Petra Martinka. Dle výrobce je tento konektor konstruován až pro rychlosti 20 000 ot./min. V laboratoři jsem prováděl testování pro maximální otáčky 300 ot./min, což je maximum, které lze na testovacím zařízení přítomném v laboratoři bezpečně dosáhnout. Tento konektor lze užít k napájení detektorů v lopatkách větrných elektráren, kde tyto detektory musí být galvanicky odděleny viz kapitola 1, medicíně, studiové technice, detektorových systémech apod.

Detail otočného konektoru SPINNER Single-Channel FORJ 1.068 je uveden na obrázku 5.23.

Fotografie realizovaného přípravku s popisem jeho částí je uvedena na obrázku 5.24.



Obrázek 5.23: Detail měřeného otočného konektoru SPINNER (přípravek pro testování otočného konektoru byl vyroben v rámci disertační práce ing. Petra Martinka).



Obrázek 5.24: Fotografie zařízení s otočným konektorem SPINNER (přípravek pro testování otočného konektoru byl vyroben v rámci disertační práce ing. Petra Martinka).

Zařízení se skládá z optické a elektrické části. V optické části je použit jako zdroj záření laser SAFIBRA, s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) s nastaveným výkonovým režimem P_2 ($\sim 12,5$ mW). Výstupním vláknem laserového zdroje je vlákno SMF-28, které je přes konektorovou spojku (FC/PC) připojeno k hybridní vláknové propojce. Vložený úsek jednovidového vlákna SMF-28 má za účel snížit opotřebení konektoru laseru, popřípadě snížit pravděpodobnost poškození nešetrnou manipulací. Hybridní propojka je tvořena vláknem FG105LCA a je osazena konektorem FC/PC a SMA. Konektor SMA je připojen na otočný konektor SPINNER. Na druhý konec otočného konektoru je připojen přibližně metrový úsek hybridní vláknové propojky tvořené vláknem FG105LCA s konektory SMA a FC/PC. Konektor FC/PC hybridní vláknové propojky je připojen k optickému detektoru S302C. Elektrická část detektoru je přes (elektrický) otáčivý konektor, který tvoří spodní část otáčivého rámu, připojena k řídicí konzoli PM100D.

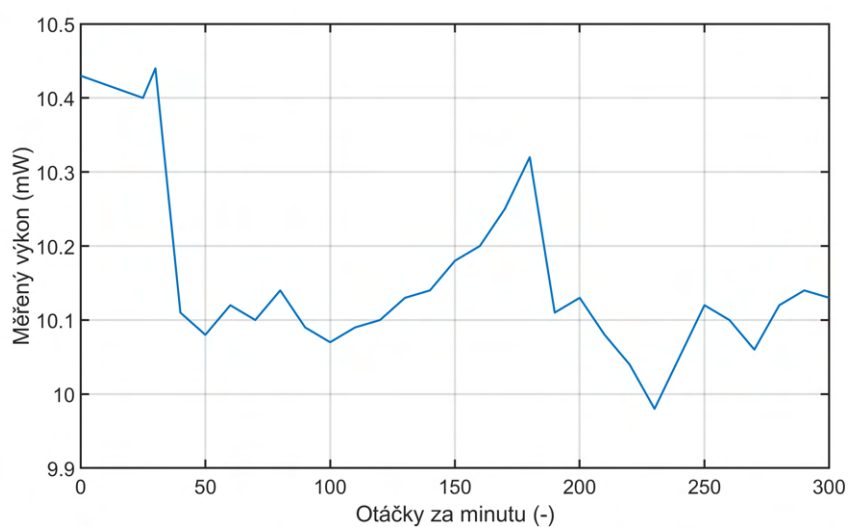
Pro účely změny smyslu otáčení motoru je zařízení vybaveno přepínačem. Pokud je páčka v levé poloze motor se otáčí po směru hodinových ručiček, pokud ve střední poloze je vypnut a pokud v pravé poloze motor se otáčí v protisměru hodinových ručiček. Motor otáčí kovovým rámem, ve kterém je upevněn detektor S302C a propojovací vlákno.

Regulace otáček motoru a tedy i otáček otočného konektoru je regulována pomocí ovládacího panelu, který je součástí řídicí jednotky elektromotoru. Zařízení je vybaveno taky světelnou závorou, která slouží jako snímač otáček motoru. Vyhodnocení signálů světelné závory a řízení regulátoru motoru obstarává NANO Arduino. Na ovládacím panelu jsem reguloval napětí elektromotoru a pomocí počítačové displeje jen nastavoval požadované napětí a otáčky. Měření jsem prováděl při směru otáčení po směru hodinových ručiček neboť se zdálo, že je v tomto směru otáčení při nízkých otáčkách plynulejší. Při velmi nízkých otáčkách 10 - 30 ot./min. docházelo k trhavým pohybům a nepravidelné rychlosti otáčení.

Z tohoto důvodu jsem měření započal až při 25 ot./min. a rychlost jsem postupně zvyšoval. Před samotným měřením jsem ověřil úroveň výkonu při použití SMA konektoru. Naměřená hodnota výkonu na SMA konektoru byla $12,44 \pm 0,37$ mW. Poté jsem připojil měřící zařízení na otočný SMA konektor a udělal odměr při vypnutém motoru. Po zaznamenání hodnoty jsem nastavil rychlost otáčení na 25 ot./min. a dále zvyšoval s krokem $+ 5$ ot./min. až do 300 ot./min. Přibližně od 170 ot./min. začalo docházet k chvění celého zařízení. To bylo způsobeno nedokonalým vyvážením komponent připevněných na otočném rámu. Rozhodl jsem se již dále nepokračovat ve zvyšování rychlosti otáčení nad 300 ot./min, neboť docházelo již k poměrně silným vibracím a mohlo by dojít poškození měřící sestavy. Z grafu na obrázku 5.25 je patrné, že k největší změně došlo na začátku měření kdy konektor setrval v klidovém stavu.

Nicméně je třeba dodat, že rozptyl naměřených hodnot je stále v intervalu nejistoty měření detektoru S302C a otočný konektor lze prohlásit v otáčkách od 0-300 ot./min. jako nezávislý na rychlosti otáčení. Výrobce Thorlabs pro detektor udává na svých stránkách relativní nejistotu měření 5 % pro

rozsah 190 nm - 25 μ m a pro vlnovou délku 1064 nm pak relativní nejistotu měření 3 %. Pokud tedy určíme střední hodnotu naměřených hodnot jako $10,13 \pm 0,30$ mW, s předpokladem že relativní nejistota měření bude blízka 3 % i v bezprostředním okolí, za které lze považovat vzhledem k celkovému rozsahu měřicího detektoru i vlnovou délku 976 nm. Zmíněná relativní nejistota ($\pm 0,30$ mW) tak ve svém intervalu pokryje všechny naměřené hodnoty. Dle výrobce je tento konektor konstruován až pro rychlosti 20 000 ot./min, což je přibližně o dva řády více, než lze na zařízení zkonstruovaném v laboratoři bezpečně dosáhnout.



Obrázek 5.25: Naměřená úroveň výkonu při různých otáčkách otočného konektoru.

Kapitola 6

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a prakticky ověřit účinnou metodu vazby mezi optickými vlákny s rozdílnými geometrickými a optickými vlastnostmi. Vazba vláken byla určena pro přenos výkonového optického záření pro napájení vzdáleného zařízení napájeného výhradně prostřednictvím optických vláken (technologie Power over Fiber). Návrhy jsou simulovány v prostředí BeamPROP-RSoft.

V této práci byla uvažována situace, kdy zdrojovým vláknem je vlákno FG105LCA, které má průměr 105/125 μm (jádro/plášť) a skokový profil indexu lomu. Hlavním cílem bylo nalezení nejúčinnější metody vazby s vláknem o průměru jádra 50 μm . V práci byly zkoumány vazby mezi vlákny s průměry jádra 62,5 μm (OM1), 50 μm (OM2) a vlákny SMF o průměru jádra 4 a 9 μm . Vlákna s průměrem jádra 50 μm byla zkoumána jak s gradientním profilem indexu lomu, tak s profilem se skokovou změnou indexu lomu (vlákna FG050LGA, Molex 50/70 μm).

Celkem bylo porovnáváno pět způsobů vazeb. První základní metodou využívala přímé napojení vláken pomocí FC/PC konektoru. V druhé metodě byla na sebe napřímo navařována. Třetí metoda využívala vložení úseku vlákna s dvojitou plášťovou strukturou DCF vlákna mezi zdrojové a navazované vlákno. Čtvrtou možností bylo použití taperovaných vláken. Pátou zkoumanou metodou bylo přímé připojení pomocí hybridního konektoru s optickými čočkami.

Zvýšení účinnosti vazby se prokázalo při použití vláknových taperovaných přechodů. Tyto přechody byly vyrobeny pomocí zařízení VytranTM GPX-3000. Výstupy simulací potvrzují minimální vliv tvaru taperu na výsledné účinnosti vazby. Pro účely měření se podařilo vytvořit tři vzorky využívající taperové přechody: S12 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm))/OM1/taper(62,5 \rightarrow 50 μm)/SMF 9 μm , S15 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 62,5 μm))/OM2) a S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm))/OM2). Nejvyšší účinnosti měření dosáhl vzorek S16 (FG105LCA/taper(105 \rightarrow 50 μm))/OM2). Nejvyšší útlum u tohoto vzorku byl naměřen -3,29 dB na vlnové délce 980 nm nejmenší útlum pak na vlnové délce 850 nm -2,78 dB. Vzorek S16 dosahuje lepší účinnosti vazby, než komerčně vyráběný vzorek MH GoPower, který má na porovnávaných vlnových délkách o 1,58 – 2,21 dB větší útlum. Je důležité poznamenat, že výstupní vlákno vzorku MH GoPower má skokový profil indexu lomu, zatímco

výstupní vlákno vzorku S16 (FG105LCA/taper(105 → 50 μm)/OM2) má gradientní profil indexu lomu. V rámci měření se mimo jiné potvrdilo, že rozdílné profily indexů lomů navazovaných vláken snižují účinnost vazby.

Pro případ vazby energie mezi vlákny se skokovým profilem indexu lomu, se jeví jako nejvýhodnější metoda pomocí čočkového konektoru OZ Optics. V případě, kdy byl ke vstupnímu vláknu FG105LCA a navazovanému vláknu FG050LGA připojen čočkový konektor, vložený útlum byl -1,0 až -1,2 dB. Pokud byl připojen ke vstupnímu vláknu Molex (100/140 μm) a výstupnímu vláknu Molex (50/70 μm), pro které je čočkový konektor z výroby optimalizován, útlum spoje byl pouze -0,8 až -0,9 dB. Pokud však k čočkovému konektoru bylo připojeno gradientní vlákno OM2 zvýšil se útlum na -14,1 až -15,8 dB. Čočkový konektor se tedy jeví pro vazbu vláken s gradientním profilem indexu lomu jako nevhodný.

V rámci práce byla zkoumána také optická vazba do jednovidových vláken. Zkoumané metody vazby V těchto případech byly málo účinné. Ačkoliv se oproti vazbě vláken s přímým navařením V některých případech snížil i o několik dB, stále byl měřený útlum $\geq 14,8$ dB.

Dále byly měřeny vybrané součástky pro vazbu vláken s odlišnými vlastnostmi v systémech PoF. V rámci těchto měření byly zjišťovány a s dokumentací výrobce ověřovány vlastnosti dvou rozbočnic 1×2Y s vlákny o průměru jádra 105 μm, skokovým profilem indexu lomu a numerickou aperturou 0,22. U rozbočnic byl měřen jejich útlum mezi jednotlivými výstupy.

Byla také měřena spektrální charakteristika jednoduchého systému WDM-1×2 se SMF vlákny o průměru jádra 9 a 4 μm. K WDM byla připojena širokospektrální SLED pracující na centrální vlnové délce 1298 nm a laser pracující na 808 nm.

Následně jsem měřil vlastnosti experimentálního otočného optického konektoru. Zde jsem prováděl měření vlivu počtu otáček za minutu na účinnost přenosu otočného konektoru SPINNER - Single-channel FORJ. Měření prokázalo, že účinnost vazby se liší mezi klidovým a rotujícím stavem v průměru o 0,3 mW. Při změně otáček v rozsahu 50-300 ot. min byl rozdíl přeneseného výkonu maximálně 0,3 mW.

Z výsledků práce lze konstatovat, že při spojování vláken se skokovou změnou indexu lomu se jako nejúčinnější metodou vazby jeví použití čočkového konektoru. Pokud je navazováno vlákno s odlišným profilem indexu lomu, je nutné využít jinou metodu. Pro případy s gradientním vláknem se jeví jako nejúčinnější metoda vazby pomocí vláknového taperového přechodu. Naměřené hodnoty také napovídají, že metoda vazby využívající vláknového taperového přechodu není příliš účinná při velkých rozdílech průměrů jádra, jako je tomu při vazbách z vlákna FG105LCA s průměrem 105/125 μm (jádro/plášť) na vlákno SMF s průměrem 9/125 μm (jádro/plášť).



Literatura

- [1] C. Diouf , V. Quintard, L. Ghisa, M. Guegan, A. P´erenou, L. Gautier, M. Tardivel, S. Barbot, V. Dutreuil, F. ColasC, *Design, Characterization, and Test of a Versatile Single-Mode Power-Over-Fiber and Communication System for Seafloor Observatories*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 45, (2), pp. 656-664, 2020.
- [2] M. Matsuura, *Power-Over-Fiber Using Double-Clad Fibers*, Journal of Lightwave Technology, vol. 40, (10), pp. 3187-3196, 2022
- [3] F. M. A. Al-Zubaidi, D. S. Montero and C. Vazquez, *SI-POF Supporting Power-Over-Fiber in Multi-Gbit/s Transmission for In-Home Networks*, Journal of Lightwave Technology, vol. 39, (1), pp. 112-121, 2021.
- [4] M. Matsuura, *Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies*, Photonics, vol. 8, (8), pp. 335, 2021.
- [5] S. Fafard and D. P. Masson, *Perspective on photovoltaic optical power converters*, Journal of Applied Physics, vol. 130, (16), pp. 160901, 2021.
- [6] J. B. Rosolem, *Power-Over-Fiber applications for telecommunications and for electric utilities*, in Anonymous IntechOpen, 2017,
- [7] J. D. Lopez-Cardona, C. Vazquez, D. S. Montero, P. C. Lallana, *Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments*, Journal of Lightwave Technology, vol. 36, (3), pp. 748-754, 2018.
- [8] B. Zhu, T. F. Taunay, M. F. Yan, J. M. Fini, M. Fishteyn, E. M. Monberg, F. V. Dimarcello, *Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network*. Optics express. 18. 11117-22. 10.1364/OE.18.011117.
- [9] R. R. Thomson, H. T. Bookey, N. D. Psaila, A. Fender, S. Campbell, W. N. MacPherson, J. S. Barton, D. T. Reid, and A. K. Kar, *Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications*, Opt. Express 15, 11691-11697 (2007)
- [10] R.Hui, M.O’Sullivan and I.Books24x7, *Fiber Optic Measurement Techniques*, (1st ed.) 2009. DOI: 10.1016/B978-0-12-373865-3.X0001-8.

- [11] BHAUMIK, Sudipta a Andrew MCGRATH. *Differences between OM1, OM2, OM3, OM4, OS1, OS2 fiber optic cable nomenclatures*, [online]. In: . STL, Únor 2021, s. 4 [citováno: 10. 04. 2023]. Dostupné z: https://stl.tech/wp-content/uploads/2023/04/Differences_between_OM1__OM2__OM3__OM4_.pdf
- [12] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, S. Todoroki, *Propagation mechanism of polymer optical fiber fuse*, Scientific Reports, vol. 4, (1), pp. 4800-4800, 2014.
- [13] A. M. Rocha, F. Domingues, M. Facão, P.S. André, *Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber*, in 2011, . DOI: 10.1109/IC-TON.2011.5971025.
- [14] Thorlabs, Inc., *Intrinsic Damage Threshold*, [online]. [citováno: 25. 03. 2023]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1362#Section3
- [15] K. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi, H. Sasaki., *Evaluation of high-power endurance in optical fiber links*, Furukawa Review 24.24 (2003): 17-22.
- [16] H. Helmers, *PV-cells for optical power transmission*, [zveřejněno] březen 2014, [citováno] 10.6.2022
- [17] P. Wei, Z. Cheng, H. Hui, L. Shenting, L. Chunlong, D. Hui. (2019), *Power-over-fiber system with energy management scheme for electric power industry*, Optical Engineering. 58. 1. 10.1117/1.OE.58.9.096104.
- [18] D. Kos, *Napájecí zdroj Power-Over-Fiber*, Diplomová práce VUT - Brno 2018.
- [19] D. Donlagic, *In-line higher order mode filters based on long highly uniform fiber tapers*, in Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 9, pp. 3532-3539, Sept. 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.878497.
- [20] A. J. Fielding, K. Edinger and C. C. Davis, *Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers*, in Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 9, pp. 1649-1656, Sept. 1999, doi: 10.1109/50.788571.
- [21] A. Mendez, T. F. Morse, T. F. Morse, *Specialty Optical Fibers Handbook*, 2007;2006;2011; kap. 18. DOI: 10.1016/B978-0-12-369406-5.X5000-0.



Technické dokumentace

- [a]. BELDEN, Inc. *Hybrid Copper-Fiber Cable - FiberExpress* [online] BELDEN, Inc. © zveřejněno: 30. prosince 2020. [citováno: 15. 5. 2023] Dostupné z: <https://www.belden.com/dfsmedia/f1e38517e0cd4caa8b1acb6619890f5e/12493-source/options/view/indoor-hybrid-breakout-cable-family-technical-data-sheet-rev-5>
a <https://www.belden.com/dfsmedia/f1e38517e0cd4caa8b1acb6619890f5e/12506-source/options/view/indoor-hybrid-distribution-cable-family-technical-data-sheet-rev-4> (zveřejněno 14. ledna 2023)
- [b]. OPTOKON, a.s., *Outdoor Hybrid Copper-Fiber Multitube Cable 24F+4x2.5 (IC)* OPTOKON, a.s. © zveřejněno: 26. ledna 2022. [citováno 15. 5. 2023] Dostupné z: [https://intra.optokon.com/intra/product-documents/529/\Outdoor%20Hybrid%20Copper-Fiber%20Multitube%20Cable%2024F+4x2.5%20\(IC\)_2022-01-26.pdf](https://intra.optokon.com/intra/product-documents/529/\Outdoor%20Hybrid%20Copper-Fiber%20Multitube%20Cable%2024F+4x2.5%20(IC)_2022-01-26.pdf)
- [c]. JDSU *PPM5-Photonic-Power-Module* [online] JDSU © Prosinec 2006 [citováno: 25. 3. 2023] Dostupné z: https://www.laser-technology.com/images/ppm5_ds_pp_ae.pdf
- [d]. MH GoPower *MH GoPower POF-WL240 Series - Power over Fiber Smart Monitoring System* [online] © 29. června 2017 [citováno: 25. 3. 2023] Dostupné z: https://photonicssolutioncenter.com/media/companies/109/products/494/documents/pof-wl240_datasheet_06-29_kyns.pdf
- [e]. RHL Industries, Inc. - *Power over Fiber RHL Industries - Power over Fiber Vysílací a Příjímáčí jednoty* [online] © 19. ledna 2018 [citováno: 25. 3. 2023] Dostupné z: https://www.fiberopticlink.com/wp-content/downloads/_pdf/products/PoF_DS-127-web.pdf

[f]. MH GoPower, comp. *YCH Series MIH® Photovoltaic Power Converter*
[online] © Kaohsiung City 821011, Taiwan, 1. října 2021 [citováno: 04. 04. 2023]
Dostupné z:
http://www.mhgopower.com/laser_pof_YCHPPC.html

Příloha A

Teoretická část, návrhy a simulace

A.1 Nejistoty měření

Standardní nejistota typu „A“ - statistické zpracování měřené veličiny. Chyba měření udávající míru nejistoty se považuje za neznámou a s rostoucím počtem měření postupně klesá. Standardní nejistota typu „A“

Standardní nejistota měření u_a je definována vztahem A.1.

$$u_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N \cdot (N - 1)}}, \quad (\text{A.1})$$

kde x_i je naměřená hodnota \bar{x} aritmetický průměr všech vzorků, N počet měření.

Standardní nejistota „B“ - udává nejistotu měřené veličiny, která je ovlivněna známým faktem např. nepřesností přístroje. Tento druh nejistoty není závislý na počtu měření. Tato nejistota se značí u_b .

Kombinací standardních nejistot u_a a u_b vznikne kombinovaná nejistota u_c definovaná vztahem A.2.

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}, \quad (\text{A.2})$$

Kombinovaná nejistota u_c udává celkový vliv nejistot u_a a u_b na naměřenou hodnotu.

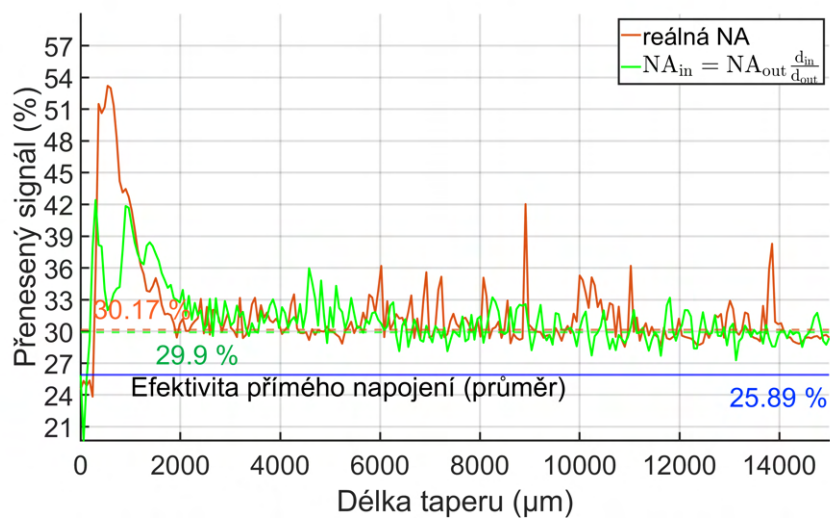
Tato část pojednávající o nejistotách měření byla inspirována vysokoškolskými skripty „Elektronická měření: přístroje a metody“ (HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02731-7).

Tabulka A.1: Seznam potřebných součástek a jejich potřebné množství pro konstrukci sestavy pro vazbu volným prostorem.

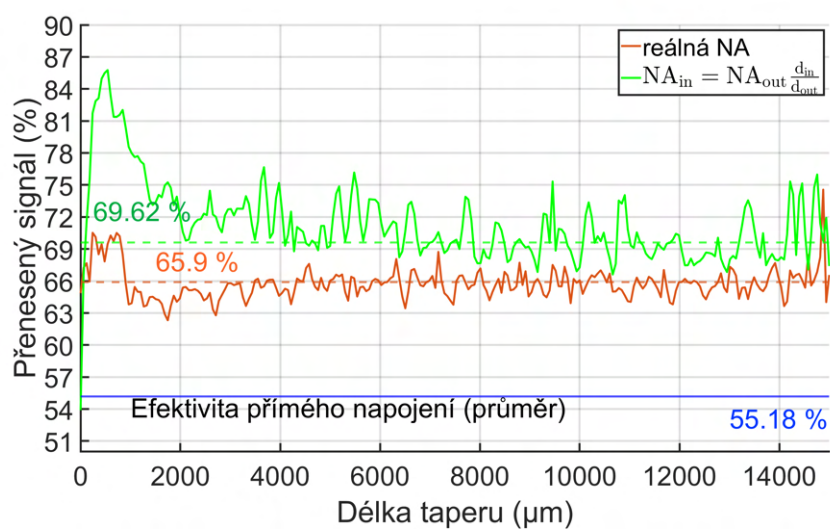
Kód	Popis součástky	Potřebné množství
CP08FP/M	Fiber Port Adapter pro 30 mm kazetový systém s vylepšeným metrickým upínáním	2
SM1FC	FC/PC Adapterový modul s vnějším SM1 (1,035"-40 závitem, široký klíč (2,2 mm))	2
CP1M09/M	Kazeta pro upevnění asférických a achromatických čoček	2
C330TMD-A	Asférická čočka (parametry viz tab. 2.2)	1
A110TM-A	Asférická čočka (parametry viz tab. 2.2)	1
ER4-P4	Kovové tyčky pro uchycení a propojení jednotlivých 30 mm kazet	1

Tabulka A.2: Vstupní parametry nastavené v simulačním prostředí RSoft-BeamPROP.

Parametr	Hodnota	Vysvětlivky
Index (-)	1,4507	Index lomu jádra - zde FG105LCA
Background index (-)	1,4339	Index lomu okolí (pláště)
Free space wavelength (μm)	0,98	Uvažovaná vln. délka vstupního pole (λ) ve vakuu
Launch Field Type	MultiMode	Typ zdrojového pole
Monitor Type	Partial Power	Typ nastaveného výstupního monitoru
Normalization (monitor)	Input Power	Hodnoty monitoru budou normalizovány vzhledem k vstupnímu výkonu

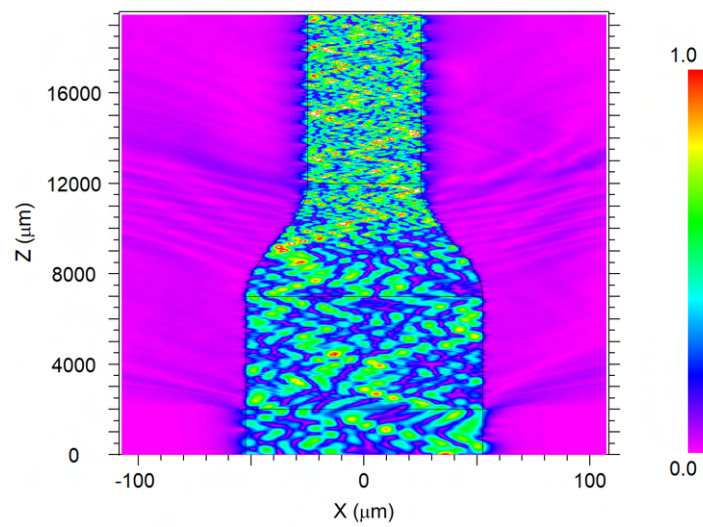


(a)

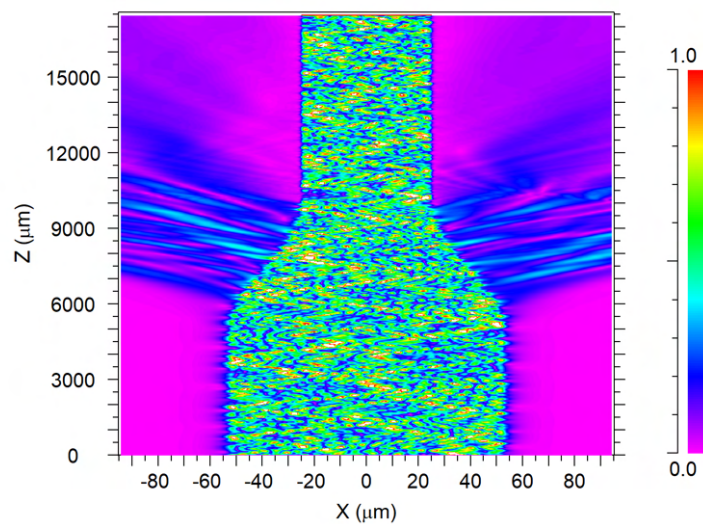


(b)

Obrázek A.1: Výsledek počítačové simulace pro předpokládaný průměr jádra optického vlákna o rozměrech a) 30 μm b) 70 μm s reálnými NA a dále pak NA splňující podmínku dle vztahu 3.3.



(a)



(b)

Obrázek A.2: Počítačová simulace taperovaného vlákna FG105LCA s navazujícím vláknem FG050LGA při a) $NA_{in} = NA_{out}$, b) $NA_{in} = 2 \cdot NA_{in}$ při průměru jádra navazujícího vlákna $50 \mu\text{m}$ dle podmínky 3.3. Simulovaná vlnová délka je 980 nm .

Příloha B

Měření Vlastnosti optických zdrojů

B.1 Měření výkonů optických zdrojů

V této kapitole jsou uvedeny naměřené výsledky vlastností použitých optických zdrojů, které byly v rámci diplomové práce použity.

Pro minimalizaci opotřebení zabudovaných konektorů spektrálního analyzátoru a použitých optických zdrojů bylo použito předřadné vlákno OM2. Na předřadné vlákno byl při měření připojen přibližně metrový úsek vlákna FG105LCA s FC/PC konektory. Pro několik případů bylo pak nutné použít metrový úsek FG105LCA vlákna osazeným FC/ACP konektorem na jednom konci a FC/PC konektorem na konci druhém.

Celkem bylo proměřováno jedenáct optických zdrojů. Osm zdrojů bylo od společnosti SAFIBRA, s.r.o., dva od společnosti OPTOKON, a.s. Posledním zdrojem pak byl Nd:YVO₄ laser. Jedná se o neodymový laser dopovaný yttrium vanadatem. Pro čerpání tohoto laseru byl použit napájecí zdroj od společnosti CASIX.

V některých návrzích je uvažován také širokospektrální zdroj. Ten je zde zastoupen laserovými SLED diodami, které jsou vyrobené společností SAFIBRA, s.r.o. Některé zdroje, které jsem měl k dispozici mohou v některý dosahovat i vyššího optického výkonu, který překračuje maximální povolený výkon P_{\max} u použitých optických detektorů, kde maximální výkon nesmí přesáhnout 20 mW. Regulace výstupního výkonu u optických zdrojů SAFIBRA, s.r.o. je řešena pomocí zabudovaných tlačítek P_0 (100 % P_{\max}), P_1 (50 % P_{\max}) a P_2 (10 % P_{\max}) viz 4. Zařízení výrobce OPTOKON, a.s. pak neobsahovala žádný vestavěný regulátor výkonu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách B.2, B.3, B.4, B.1. Pro měření výkonu optických zdrojů překračující výstupní optický výkon 20 mW (13 dBm) byl použit detektor S415C. Technické parametry detektoru jsou uvedeny v kapitole 4. Z hodnot uvedených v tabulce B.1 je pak patrné, že naměřené hodnoty se nachází v oblasti pracovního bodu Laserové Diody.

Tabulka B.1: Závislost výstupního výkonu Nd:YVO₄ laseru na budícím proudu LD ve zdroji CASIX LDC-1500, λ 532 nm. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.

Budící proud (mA)	0,2	0,3	0,4	0,5
Výstupní optický výkon (μ W)	0,8	1,4	1,7	6,4

Tabulka B.2: Naměřené výkony laserů SAFIBRA, s.r.o. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.

Název použitého zdroje	λ (nm)	P2 (mW)	P1 (mW)	P0 (mW)
OFLS-L-658-3	650	0,956	6,412	8,126
OFLS-6-808-250-FP-PC/APC	808	18,03	106,6	224,7
OFLS-L-850-10	850	1,312	7,215	15,2
OFLS-6K PLM 976 nm	976	18,11	76,45	148,8
OFLS-L-1550-2	1550	0,133	0,681	1,387

Tabulka B.3: Naměřené výkony SLED SAFIBRA, s.r.o. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.

Název použitého zdroje	λ (nm)	P2 (mW)	P1 (mW)	P0 (mW)
OFLS-B-31-10-100-C-3	1298	0,108	0,548	1,005
OFLS-B-48-15-40-C	1474	0,018	0,097	0,197
OFLS-B-55-10-100-C	1565	0,033	0,197	0,408

Tabulka B.4: Naměřené výkony laserů vybraných zařízení OPTOKON, a.s. Výstup laseru a detektor byly propojeny pomocí vlákna FG105LCA zakončeného konektorem FC/PC.

Název použitého zdroje	λ (nm)	výkon (mW)
LS-800	1490	2,03
LS-800	1550	0,85
OFT-840	1310	1,86

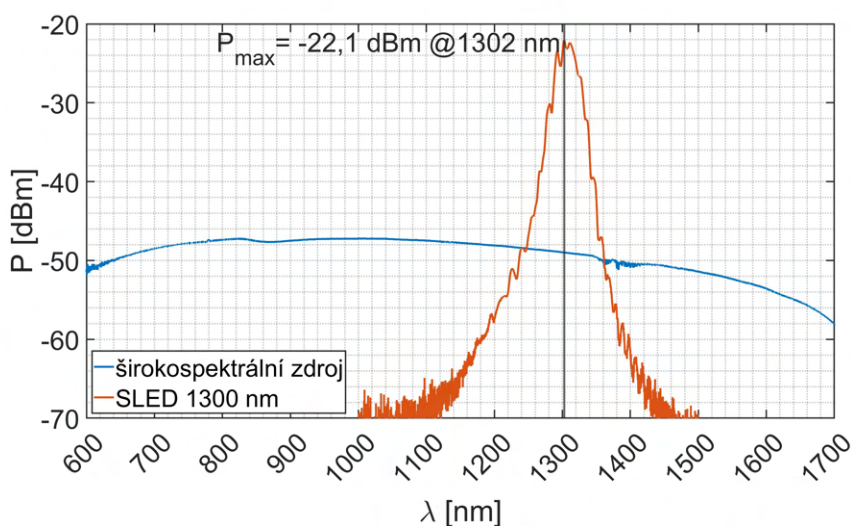
B.2 Spektrální charakteristiky optických zdrojů

Spektrální charakteristiky byly měřeny pomocí spektrálního analyzátoru YO-KOGAWA AQ6370C s nastaveným měřícím krokem 0,2 nm. Citlivost přístroje byla nastavena na „HIGH2“. Rozsahy vlnových délek byly upravovány tak, aby obsáhly dostatečně široké okolí předpokládaného optického P_{\max} laseru, ale zároveň nebyly proměřovány části spektra, kde se předpokládá výkonová úroveň pod úrovní šumu. Úrovně optických výkonů, které se nacházely pod úrovní šumu nebyly při vykreslování do výstupních charakteristik zahrnuty. K propojení laserů a analyzátoru bylo použito vícevidové vlákno FG105LCA zakončené FC/PC konektory resp. vlákno FG105LCA osazeným FC/APC

konektorem na straně jedné a FC/PC konektorem na straně druhé. S výjimkou laseru OFLS-6K PLM vyzařujícího na vlnové délce 976 nm nebylo třeba používat režim s nižším výstupním výkonem (P_1 , P_2). Na výstupu laseru OFLS-6K PLM byl použit výkonový režim P_2 .

Nejprve byly proměřeny charakteristiky širokospektrálních zdrojů a to jak již dříve použitého zdroje SLS201L/M (Thorlabs), tak širokospektrální SLED SAFIBRA OFLS-B-31-10-100-C. Pro lepší porovnání byly spektrální charakteristiky těchto dvou zdrojů vyneseny do společného grafu na obrázku B.1.

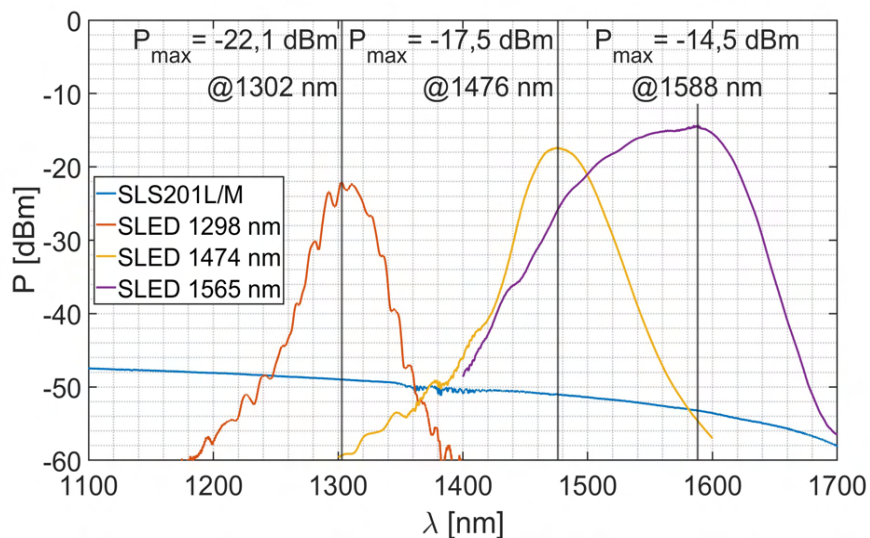
Na obrázku B.1 je vyznačena centrální vlnová délka a maximální výkon P_{\max} měřené SLED. Je také patrné že oproti zdroji SLS má SLED mnohem užší rozsah vyzařovaného spektra. Dle očekávání má ale také vyšší vyzařované výkonové maximum a to o přibližně 25 dB. Pro SLED je tedy P_{\max} přibližně 6,2 μW a pro zdroj SLS201 přibližně 17,7 nW. Naměřené výkony jsou silně závislé na vstupní vazbě do vlákna. Za povšimnutí také stojí fakt, že výkonové maximum je oproti hodnotám ze štítku přístroje SLED (udávaná hodnota je 1300 nm) posunuta přibližně o 2 nm směrem k delším vlnovým délkám.



Obrázek B.1: Spektrální charakteristiky zdroje SLS201L/M a SLED SAFIBRA OFLS-B-31-10-100-C. Na výstup zdrojů záření bylo připojeno vlákno FG105LCA, které bylo přes konektorovou spojku FC/PC propojeno s vláknem OM2. Vlákno OM2 bylo připojeno do optického vstupu spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C.

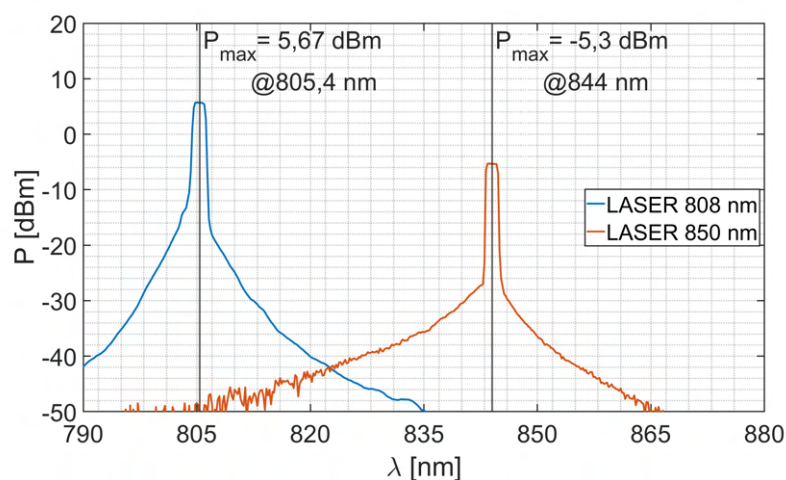
Obrázek B.2 zobrazuje změřená spektra SLED diod v zařízeních konstruovaných ve společnosti SAFIBRA s.r.o. SLED, které byly měřeny mají deklarovaná vyzařovací maxima na vlnových délkách 1298, 1474 a 1565 nm. Pro porovnání zde byla vykreslena i část křivky širokospektrálního zdroje SLS201L/M. Z obrázku B.2 je také zřejmé, že ačkoliv zdroj SLS201L/M vyzařuje v mnohem širším spektru, jeho vyzařovací maximum je o 25 dB

nižší, než pro SLED 1298 nm, o 30 dB nižší než pro SLED 1474 nm a o 33 dB méně než u SLED 1565 nm.

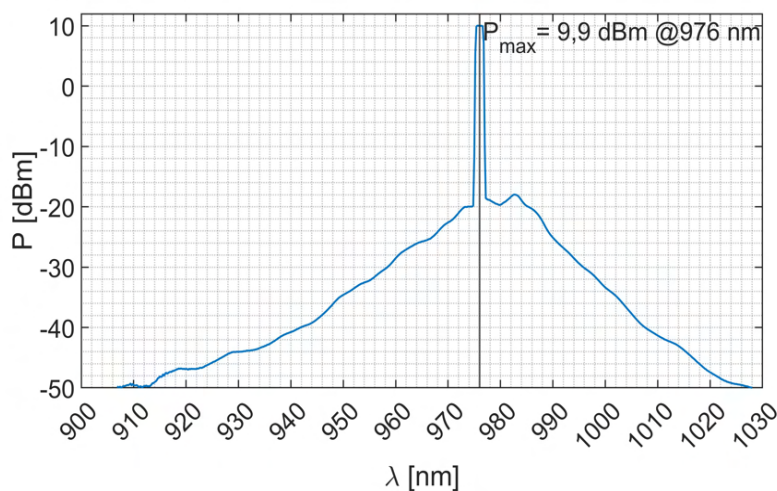


Obrázek B.2: Spektrální charakteristiky optických zdrojů SLED od firmy SAFIBRA, s.r.o. a širokospektrální zdroj SLS201L/M.

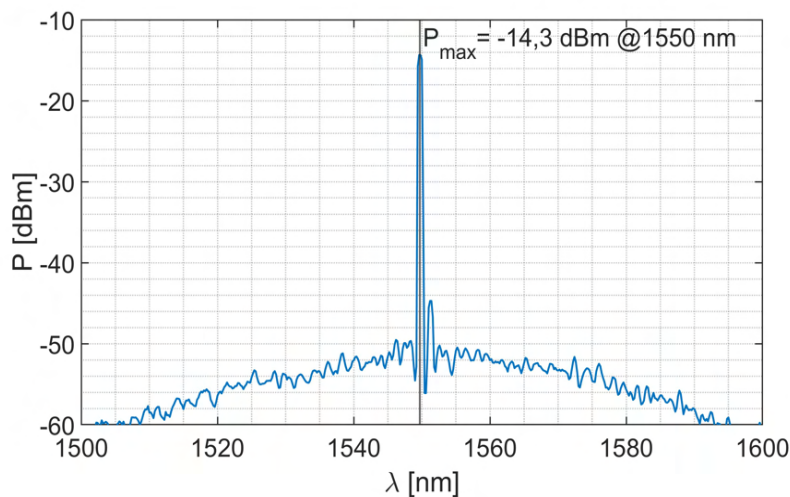
V druhém kroku jsem provedl měření laserů výrobce SAFIBRA s.r.o.. Jedná se o modely OFLS-L-658-3, OFLS-6-808-250, OFLS-L-850-10, OFLS-6K PLM a OFLS-L-1550-2 vyzařujících dle svých štítkových hodnot na 650, 808, 850, 976 a 1550 nm. Výsledné charakteristiky jsou na obrázcích B.3, B.4(a) a B.4(b).



Obrázek B.3: Spektrální charakteristika laseru OFLS-6-808-250 s vlnovou délkou 808 nm a OFLS-L-850-10 vyzařujícího na vlnové délce 850 nm.



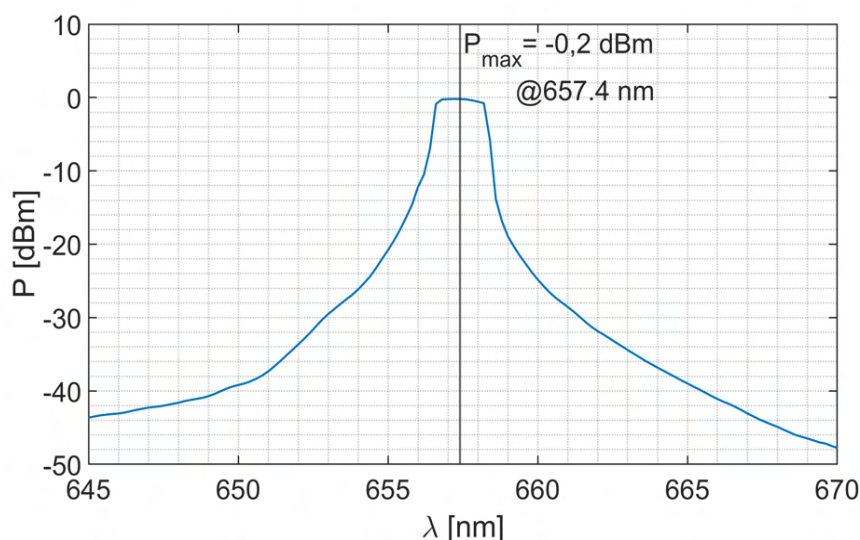
(a)



(b)

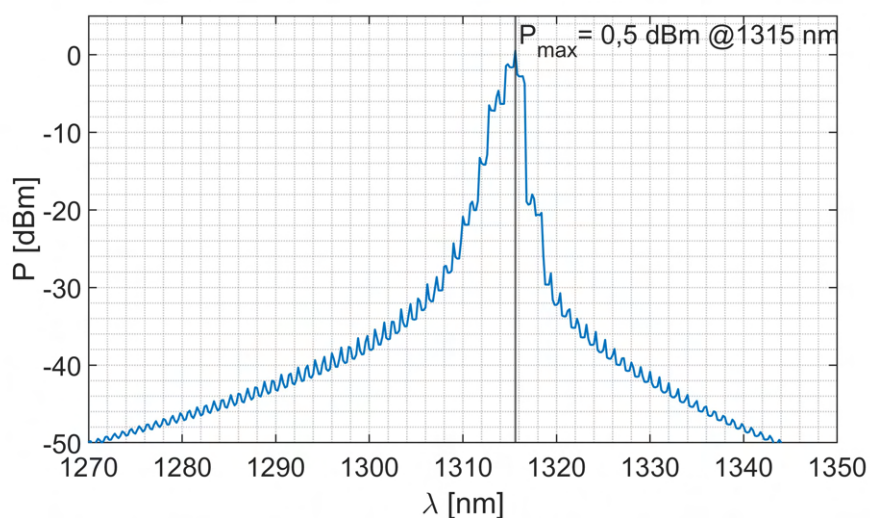
Obrázek B.4: Spektrální charakteristiky a) laseru OFLS-6K PLM vyzařujícího na vlnové délce 976 nm b) laseru OFLS-L-1550-2 vyzařujícího na 1550 nm.

Na závěr této části měření jsem změřil dva lasery od společnosti OPTOKON, a.s. Proměřeny byly modely LS-800 a OFT-840. Tato zařízení jsou určena pro diagnostiku telekomunikačních sítí. Laser zabudovaný v zařízení OFT-840 vyzařuje dle zjištění na vlnové délce 1315 nm (dokumentace uvádí 1310 nm). Jak je patrné z obrázku B.6. Laser použitý v zařízení OFT-840 vykazuje výrazně širší spektrální čáru než lasery od společnosti SAFIBRA (Mimo SLED).

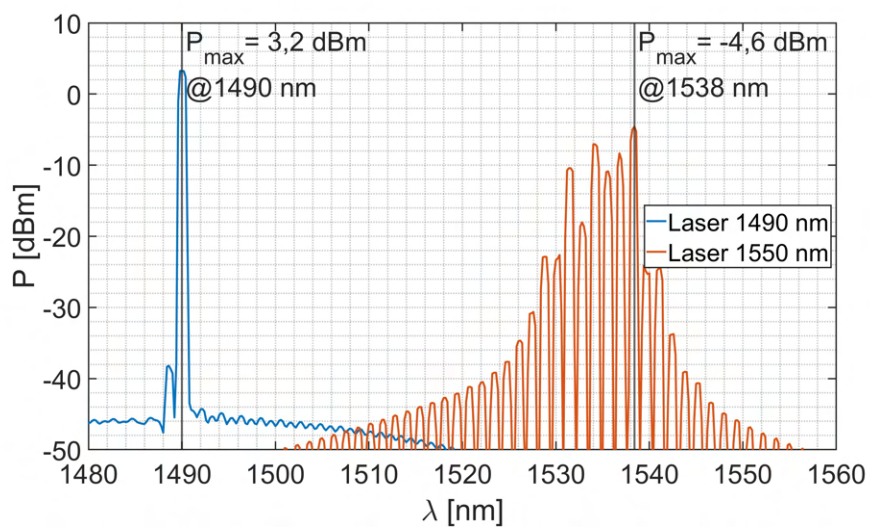


Obrázek B.5: Spektrální charakteristika laseru OFLS-L-658-3 PLM vyzařujícího na vlnové délce 650 nm.

Přístroj LS-800 umožňuje přepínání mezi laserem na vlnové délce 1490 nm a laserem na vlnové délce 1550 nm. Spektra obou laserů, které toto zařízení využívá, jsou uvedeny na obrázku B.7. Ze spektra zachyceném na tomto obrázku je zřejmé, že pro každou vlnovou délku je použit zcela odlišný typ laseru. Pro laser s uváděnou vlnovou délkou 1550 nm je dle spektra použit Fabry-Perrotův laser, zatímco pro vlnovou délku 1490 nm pravděpodobně DFB (Distributed Feed Back) nebo DBR (Distributed Bragg Reflector) laser.



Obrázek B.6: Spektrální charakteristika laseru použitým v zařízení OFT-840 vyzařujícím na vlnové délce 1310 nm.



Obrázek B.7: Spektrální charakteristika laseru LS-800 vyzařujícího na vlnových délkách 1490 a 1550 nm.

B.3 Změřené výkony u vzorků propojovaných konektory

Tabulka B.5: Výstupní výkon vzorků propojených konektory FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-808-250 ($\lambda = 808$ nm) a OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o.).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 808$ nm			$\lambda = 850$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)	P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	18 000	94 500	198 000	1 700	7 860	19 200
K1	105+62,5+50	254	3 360	4 890	378	2 822	3 700
K2	105+62,5	7 040	37 000	69 700	792	3 560	6 900
K3	105+50	4 560	21 000	38 000	786	2 870	6 200
K4	105+9	1,20	12,40	310	5,06	30,30	69
K5	105+4	0,52	0,77	1,29	1,85	10,20	32
K6	105+62,5+50 +9+4	128	148	300	9,8	15,8	35
K7	105+62,5+4	450	2 340	4 400	28	35	50
K8	105+50+4	244	594	1 020	5,8	16	53
K9	105+9+4	66	198	354	14	35	57
K10	105+9(105)	21 000	87 000	197 000	1 560	8 560	18 060
K11	105+9(105)+105	19 500	86 000	191 000	1 388	7 760	16 240
K12	105+9(105)+62,5	7 350	40 500	71 000	449	2 490	5 030
K13	105+9(105)+50	4 287	22 800	41 500	311	1 798	3 896
K14	105+9(105)+9	102,80	530	1 100	5	22	58,91
K15	105+9(105)+4	50,84	63,72	170	2,79	10,83	22,81

Tabulka B.6: Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o.

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 976$ nm			$\lambda = 1550$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)	P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	8 160	39 000	82 000	168	750	1 450
K1	105+62,5+50	1 600	8 780	17 500	45	156	330
K2	105+62,5	3 920	14 900	32 400	98	650	1 120
K3	105+50	1 990	10 200	18 800	14,82	144	282
K4	105+9	70	275	660	0,45	0,98	2,04
K5	105+4	22,30	78	189	0	0	0,01
K6	105+62,5+50 +9+4	9,80	48	133	0	0	0
K7	105+62,5+4	18	109	208	0	0	0,02
K8	105+50+4	22	87	175	0	0	0,01
K9	105+9+4	7	42	95	0	0	0
K10	105+9(105)	5 000	24 000	49 000	216	1 093	2 170
K11	105+9(105)+105	4 860	23 300	45 600	211,40	1 093	2 170
K12	105+9(105)+62,5	1 857	8 880	21 230	89,12	421,53	825,11
K13	105+9(105)+50	1378	6 880	14 320	35,15	208,17	429,76
K14	105+9(105)+9	32,19	140,97	390	1,65	8,76	16,48
K15	105+9(105)+4	15,53	45,12	150,46	0	0	0

Tabulka B.7: Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC/PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-808-250 ($\lambda = 808$ nm) a OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm). V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o.

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 808$ nm			$\lambda = 850$ nm		
		P_2 (dB)	P_1 (dB)	P_0 (dB)	P_2 (dB)	P_1 (dB)	P_0 (dB)
K1	105+62,5+50	-18,50	-14,49	-16,07	-6,53	-4,44	-7,15
K2	105+62,5	-4,07	-4,07	-4,53	-3,31	-3,44	-4,44
K3	105+50	-5,96	-6,53	-7,17	-3,35	-4,37	-4,91
K4	105+9	-41,76	-38,82	28,05	-25,31	-24,18	-24,44
K5	105+4	-45,39	-50,94	-51,86	-29,63	-28,95	-27,78
K6	105+62,5+50+9+4	-21,48	-28,05	-28,19	-22,30	-26,91	-27,39
K7	105+62,5+4	-16,02	-16,06	-16,53	-17,83	-23,51	-25,84
K8	105+50+4	-18,67	-22,01	-22,88	-24,52	-26,91	-25,59
K9	105+9+4	-24,35	-26,78	-27,47	-20,84	-23,51	-25,27
K10	105+9(105)	0,67	-0,36	-0,02	-0,37	0,37	-0,26
K11	105+9(105)+105	0,34	-2,27	-0,15	-0,88	-0,05	-0,72
K12	105+9(105)+62,5	-3,89	-3,67	-4,45	-5,78	-4,99	-5,81
K13	105+9(105)+50	-6,23	-6,17	-6,78	-7,37	-6,40	-6,92
K14	105+9(105)+9	-22,43	-22,51	-22,55	-25,31	-25,53	-25,13
K15	105+9(105)+4	-24,47	-31,69	-30,66	-27,53	-28,54	-29,21

Tabulka B.8: Výstupní výkon vzorků propojovaných pomocí konektorů FC+PC, při použití laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm) a OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm). (V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „+“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o., hodnoty s přílišným nízkým výstupním výkonem, který nebylo možné změřit jsou označeny „X“

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 976$ nm			$\lambda = 1550$ nm		
		P_2 (dB)	P_1 (dB)	P_0 (dB)	P_2 (dB)	P_1 (dB)	P_0 (dB)
K1	105+62,5+50	-7,07	-6,47	-6,70	-5,72	-6,82	-6,42
K2	105+62,5	-3,18	-4,17	-4,03	-2,34	-0,62	-1,12
K3	105+50	-6,12	-5,82	-6,39	-10,55	-7,16	-7,11
K4	105+9	-20,66	-21,51	-20,94	-25,72	-28,83	-28,51
K5	105+4	-25,69	-26,99	-26,37	X	X	X
K6	105+62,5+50+9+4	-29,11	-29,09	-27,90	X	X	X
K7	105+62,5+4	-26,56	-25,53	-25,95	X	X	X
K8	105+50+4	-25,69	-26,51	-26,70	X	X	X
K9	105+9+4	-30,66	-29,67	-29,36	X	X	X
K10	105+9(105)	-2,12	-2,10	-2,23	1,09	1,63	1,75
K11	105+9(105)+105	-2,25	-2,23	-2,54	0,99	1,63	1,75
K12	105+9(105)+62,5	-6,42	-6,42	-5,86	-2,76	-2,49	-2,45
K13	105+9(105)+50	-7,72	-7,53	-7,57	-6,81	-5,57	-5,28
K14	105+9(105)+9	-24,06	-24,41	-23,22	-20,07	-19,32	-19,44
K15	105+9(105)+4	-27,21	-29,36	-27,36	X	X	X

B.4 Přímé navaření vláken

Naměřené výsledky v μW

V případě vlákna DCF13 je v závorce uveden průměr prvního pláště vlákna. Před závorkou je průměr jádra vlákna DCF13. Znak „/“ značí konektorový spoj. P_0 , P_1 , P_2 jsou režimy umožňující zařazení vnitřního útlumového článku a regulovat tak výstupní výkon laseru SAFIBRA, s.r.o.

Tabulka B.9: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzkospektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-658-3 ($\lambda = 650$ nm) a OFLS-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 650$ nm			$\lambda = 808$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)	P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	956	6 970	8 870	18 000	96 500	202 000
S1	105/62,5/50	650	4 840	6 500	4 060	19 500	42 000
S6	105/62,5	855	6 412	8 126	8 470	47 000	81 000
S7	105/62,5	456	3 550	4 530	4 570	22 560	42 000
S2	105/50	600	4 900	5 900	3 120	18 500	31 000
S8	105/50	738	3 780	7 280	4 800	23 400	55 000
S5	105/9	91	330	746	143	598	1 200
S3	105/4	5,12	46	65	17	139	1 150
S4	105/4	5,11	46	52	7,86	678	1 000
S10	105/9(105)/9	42,15	203	231	447	2 310	6 900
S9	105/9(105)/50	627	4 760	5 480	4 060	20 100	43 000
S11	105/9(105)/62,5	815	6 400	8 000	5 200	31 000	70 000
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper (62,5 → 50)/50/9	63,24	216,41	256,51	206	1 690	2 000

Tabulka B.10: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzkospektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm) a OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 850$ nm			$\lambda = 976$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)	P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	1 430	7 520	18 200	6 000	23 000	60 000
S1	105/62,5/50	450	2 010	4 700	1 510	5 430	13 800
S6	105/62,5	539	3 298	6 370	2 145	10 950	22 190
S7	105/62,5	285,40	1 563	3 874	1 148	5 680	11 930
S2	105/50	430	400	4 700	1 610	4 800	12 800
S8	105/50	198	447	5 800	2 120	7 600	16 000
S5	105/9	356	15	200	50	198	580
S3	105/4	12	2,55	40	15	62	156
S4	105/4	0,89	3,32	30	14,18	51	125
S10	105/9(105)/9	37,56	205	415	33	170	1 000
S9	105/9(105)/50	306	1 960	3 660	1 910	9 100	27 000
S11	105/9(105)/62,5	595	3 410	7 010	2 340	11 400	29 000
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper (62,5 → 50)/50/9	20	84	193,67	32	284	2 000

Tabulka B.11: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzkospektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1550$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	193	1 050	1 950
S1	105/62,5/50	49	251	470
S6	105/62,5	77	400	766
S7	105/62,5	35	205	407,66
S2	105/50	10,13	45,24	91
S8	105/50	65	338	650
S5	105/9	1	4	7
S3	105/4	0,001	0,002	0,005
S4	105/4	0,002	0,002	0,04
S10	105/9(105)/9	0,81	2,93	13,73
S9	105/9(105)/50	37	179	462
S11	105/9(105)/62,5	64	311	673
S12	105/62,5/50/9 (taperované přechody)	3,22	6,67	23,59

Tabulka B.12: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm) a OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1298$ nm			$\lambda = 1474$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)	P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	354	1 840	3 350	505,77	2 628	5 257
S1	105/62,5/50	62	300	600	264	1 400	2 780
S6	105/62,5	270	1 300	2 700	393	1 940	4 080
S7	105/62,5	184	985	1 780	256,71	1 398	2 785
S2	105/50	73	340	680	231,54	1 100	2 010
S8	105/50	68	330	680	300	1 460	2 910
S5	105/9	2,44	11	20	8,10	34,28	54,66
S3	105/4	1,25	5,86	12	2,33	11	25,51
S4	105/4	1,52	7,31	16	1,71	3,46	7
S10	105/9(105)/9	1,68	8	16,87	12,73	129	207
S9	105/9(105)/50	49	241	528	229	1 100	2 050
S11	105/9(105)/62,5	83,34	433	1 050	251,91	1 000	1 100
S12	105/62,5/50/9 (taper. přech.)	2,28	11,34	26,42	11,44	38,27	86,19

Tabulka B.13: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1565$ nm		
		P_2 (μW)	P_1 (μW)	P_0 (μW)
-	105 (reference)	481	2 224	4 630
S1	105/62,5/50	266	1 210	2 480
S6	105/62,5	393	1 970	4 080
S7	105/62,5	252	1 200	2 456
S2	105/50	238	1 100	2 200
S8	105/50	318	1 450	2 950
S5	105/9	0,076	1,46	0,89
S3	105/4	0,083	0,39	0,85
S4	105/4	0,035	0,16	0,45
S10	105/9(105)/9	9,8	51,8	89,4
S9	105/9(105)/50	227	1 010	2 040
S11	105/9(105)/62,5	3 57	1 650	3 350
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper (62,5 → 50)/50/9	11,84	60	129

Tabulka B.14: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití laserů síťových diagnostických zařízení OPTOKON, a.s.

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků [μm]	OFT-840	LS-800	
		$\lambda = 1310$ nm (μW)	$\lambda = 1490$ nm (μW)	$\lambda = 1550$ nm (μW)
-	105 (reference)	1 860	2 000	850
S1	105/62,5/50	342	420	180
S6	105/62,5	793	798	325
S7	105/62,5	411	336	177
S2	105/50	400	380	200
S8	105/50	458	580	257
S5	105/9	10	12,51	5,34
S3	105/4	5,33	0,56	0,23
S4	105/4	2,24	0,09	0,002
S10	105/9(105)/9	7	41,84	16,43
S9	105/9(105)/50	483	405	150
S11	105/9(105)/62,5	798	980	4,10
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper (62,5 → 50)/50/9	11	4,50	4,62

Výsledky udávané v dB

Tabulka B.15: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzkospektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-658-3 ($\lambda = 650$ nm) a OFLS-6-808-250 ($\lambda = 808$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 650$ nm			$\lambda = 808$ nm		
		P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)	P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)
S1	105/62,5/50	-1,67	-1,58	-1,35	-6,46	-6,94	-6,82
S6	105/62,5	-0,48	-0,36	-0,38	-3,27	-3,12	-3,96
S7	105/62,5	-3,21	-2,93	-2,91	-5,95	-6,31	-6,82
S2	105/50	-2,02	-1,53	-1,77	-7,61	-7,61	-8,14
S8	105/50	-1,12	-2,65	-0,85	-5,74	-6,15	-5,65
S5	105/9	-10,21	-13,24	-10,75	-20,99	-22,07	-22,26
S3	105/4	-22,72	-21,80	-21,35	-30,24	-28,41	-22,44
S4	105/4	-22,72	-21,80	-22,31	-33,63	-21,53	-23,05
S10	105/9(105)/9	-13,56	-15,35	-15,84	-16,05	-16,21	-14,66
S9	105/9(105)/50	-1,83	-1,65	-2,09	-6,46	-6,81	-6,71
S11	105/9(105)/62,5	-0,69	-0,37	-0,44	-5,39	-4,93	-4,60
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper(62,5 → 50)/50/9	-11,79	-15,08	-15,38	-19,41	-17,56	-20,04

Tabulka B.16: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzkospektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-850-10 ($\lambda = 850$ nm) a OFLS-6K-PLM ($\lambda = 976$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 850$ nm			$\lambda = 976$ nm		
		P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)	P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)
S1	105/62,5/50	-5,02	-12,23	-5,87	-5,99	-6,27	-6,38
S6	105/62,5	-4,23	-3,57	-4,56	-4,46	-3,22	-4,32
S7	105/62,5	-6,99	-6,82	-6,71	-7,18	-6,07	-7,01
S2	105/50	-5,21	-12,74	-5,88	-5,71	-6,80	-6,71
S8	105/50	-8,58	-12,26	-4,96	-4,51	-4,81	-5,74
S5	105/9	-6,03	-27,00	-19,59	-20,79	-20,65	-20,14
S3	105/4	-20,76	-34,78	-26,58	-26,02	-25,69	-25,85
S4	105/4	-32,06	-33,57	-27,83	-26,32	-26,54	-26,81
S10	105/9(105)/9	-15,81	-15,64	-16,42	-22,59	-21,31	-17,78
S9	105/9(105)/50	-6,69	-5,83	-6,96	-4,97	-4,02	-3,46
S11	105/9(105)/62,5	-3,80	-3,43	-4,14	-4,09	-3,04	-3,15
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper(62,5 → 50)/50/9	-18,54	-19,52	-19,73	-22,73	-19,08	-14,77

Tabulka B.17: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití úzko-spektrálních laserů SAFIBRA s.r.o. OFLS-L-1550-2 ($\lambda = 1550$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1550$ nm		
		P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)
S1	105/62,5/50	-5,95	-6,21	-6,18
S6	105/62,5	-3,99	-4,19	-4,05
S7	105/62,5	-7,41	-7,09	-6,79
S2	105/50	-12,81	-13,66	13,31
S8	105/50	-4,72	-4,92	-4,77
S5	105/9	-22,85	-24,19	-24,45
S3	105/4	-52,85	-57,20	-54,45
S4	105/4	-49,84	-57,20	-46,88
S10	105/9(105)/9	-23,82	-25,58	-21,53
S9	105/9(105)/50	-7,17	-7,68	-6,25
S11	105/9(105)/62,5	-4,79	-5,28	-4,62
S12	105/62,5/50/9 (taperované přechody)	-17,80	-22,01	-19,19

Tabulka B.18: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-31-10-100-C ($\lambda = 1298$ nm) a OFLS-B-48-15-40-C ($\lambda = 1474$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1298$ nm			$\lambda = 1474$ nm		
		P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)	P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)
S1	105/62,5/50	-7,56	-7,87	-7,46	-2,82	-2,73	-2,76
S6	105/62,5	-1,17	-1,50	-0,93	-1,47	-1,31	-1,25
S7	105/62,5	-2,84	-2,71	-2,74	-2,94	-2,74	-2,75
S2	105/50	-6,85	-7,33	-6,92	-3,39	-3,78	-4,17
S8	105/50	-7,16	-7,46	-6,92	-2,27	-2,55	-2,56
S5	105/9	-21,68	-22,23	-22,24	-17,95	-18,85	-19,83
S3	105/4	-24,69	-25,01	-24,45	-23,36	-23,78	-23,14
S4	105/4	-23,72	-24,01	-23,21	-24,71	-28,88	-28,75
S10	105/9(105)/9	-23,44	-23,61	-22,99	-16,00	-13,09	-14,04
S9	105/9(105)/50	-8,58	-8,82	-8,02	-3,44	-3,78	-4,08
S11	105/9(105)/62,5	-6,28	-6,28	-5,03	-3,03	-4,19	-6,79
S12	105/62,5/50/9 (taper. přech.)	-22,06	-22,11	-21,03	-16,47	-18,37	-17,85

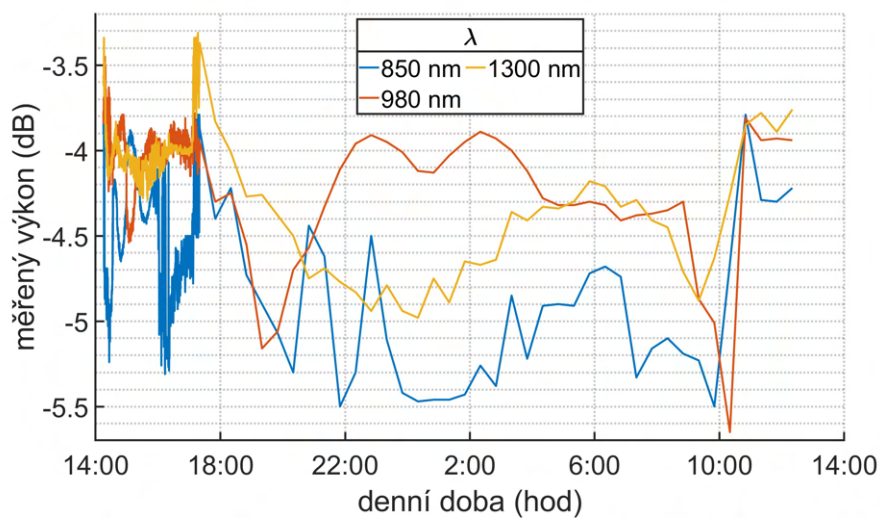
Tabulka B.19: Výstupní výkon vzorků s přímým navařením, při použití SLED SAFIBRA s.r.o. OFLS-B-55-10-100-C ($\lambda = 1565$ nm).

Číslo vzorku	Průměry jader vzorků (μm)	$\lambda = 1565$ nm		
		P ₂ (dB)	P ₁ (dB)	P ₀ (dB)
S1	105/62,5/50	-2,57	-2,64	-2,71
S6	105/62,5	-0,87	-0,52	-0,54
S7	105/62,5	-2,80	-2,68	-2,75
S2	105/50	-3,05	-3,05	-3,23
S8	105/50	-1,79	-1,85	-1,95
S5	105/9	-38,01	-31,82	-37,16
S3	105/4	-37,63	-37,56	-37,36
S4	105/4	-41,38	-41,27	-40,12
S10	105/9(105)/9	-16,91	-16,32	-17,14
S9	105/9(105)/50	-3,26	-3,42	-3,56
S11	105/9(105)/62,5	-1,29	-1,29	-1,40
S12	105/taper(105 → 62,5)/62,5/taper (62,5 → 50)/50/9	-16,10	15,68	-15,54

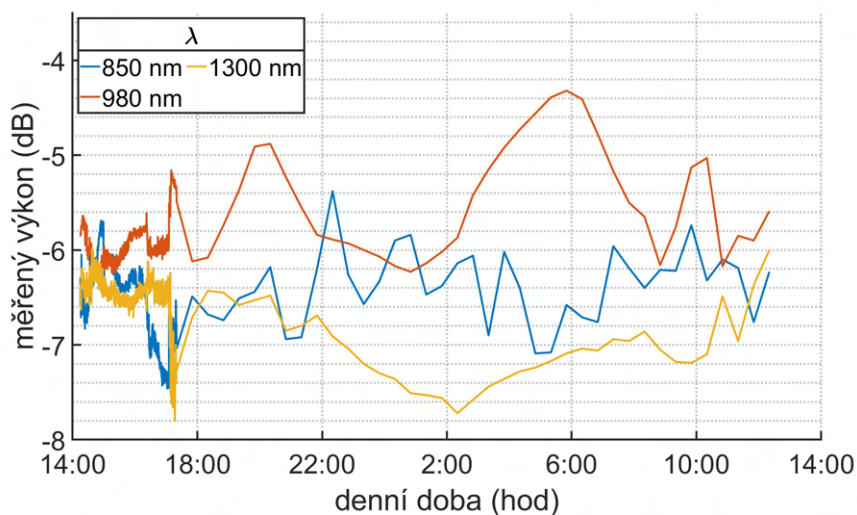
B.5 Měření vzorku 2 (FG105LCA/OM2) a 7 (FG105LCAOM1) po úpravě

Na obrázcích B.8, B.9 a B.10, jsou zobrazené úrovně výkonu pro vlnové délky 850, 980 a 1300 nm, na každém obrázku je jeden konkrétní vzorek (2, 7 nebo 12). Z obrázků B.8, B.9 a B.10 je patrné, že v průběhu měření docházel ke značným výkyvům ve výkonových úrovních a to na všech vlnových délkách. K největším výkyvům docházelo na vlnové délce 850 nm. Rozdíly mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou S_e u vzorků 2 a 7 pohybovaly v rozmezí 1,7-2,2 dB. U vzorku 12 pak dokonce rozdíl hodnot byl 8,1-9,3 dB. Takto vysoký rozptyl je dán především nízkým výstupním výkonem vzorku 12. Střední hodnota úrovně výkonu pro vzorek 12 je ~ -22 dB. Veliký rozptyl výkonových úrovní je pravděpodobně podpořen ještě šumovou složkou, která se při těchto nízkých úrovních výkonu výrazněji projevuje.

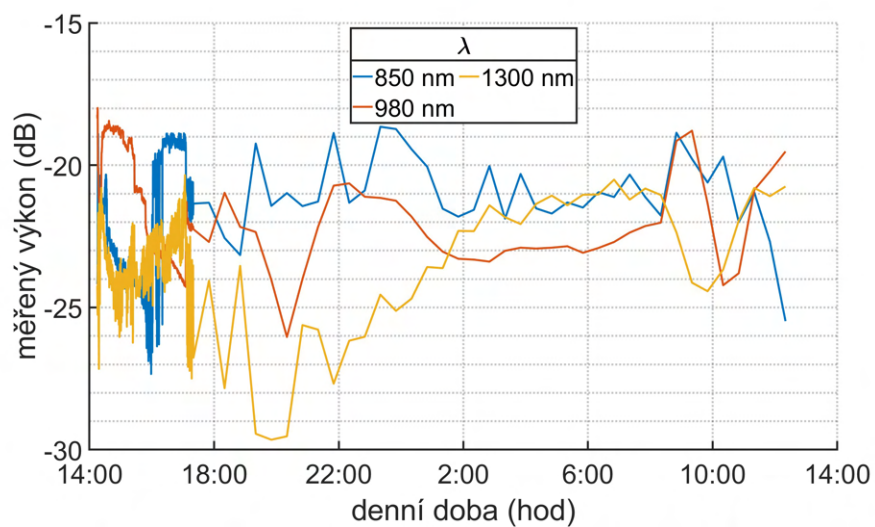
Z grafů se bohužel nepovedlo zjistit, jak výrazný je vliv teploty na výstupní výkon vzorků. Výkonové úrovně totiž kolísaly tak, že není výjimkou, že výstupní výkony na některých vlnových délkách klesají, zatím co na jiných ve stejném čase narůstají. Zabudované lasery pro jednotlivé délky jsou u zařízení OPTOKON, a.s. OFT4212 teplotně stabilizované. Během části měření (19:00 - 8:30) nebyl v laboratořích nikdo přítomen, kdo by mohl nevědomky měření ovlivňovat. Přesto docházelo ke změnám naměřených výkonových hladin a to mnohdy s opačným směrem, než u předchozích odměřů. Vliv teploty tedy nelze v průbězích jednoznačně určit.



Obrázek B.8: Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření pro opětovně navařený vzorek 7 (FG105LCA/OM1).

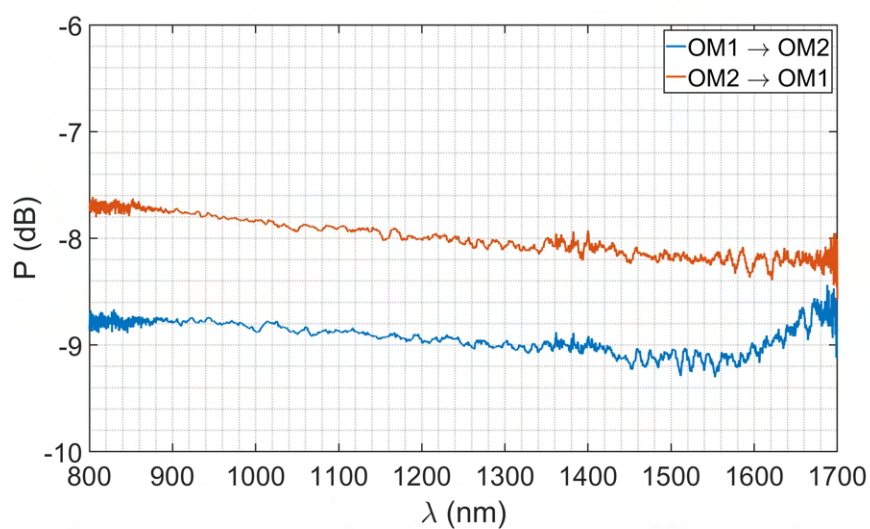


Obrázek B.9: Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření pro opětovně navařený vzorek 2 (FG105LCA/OM1).

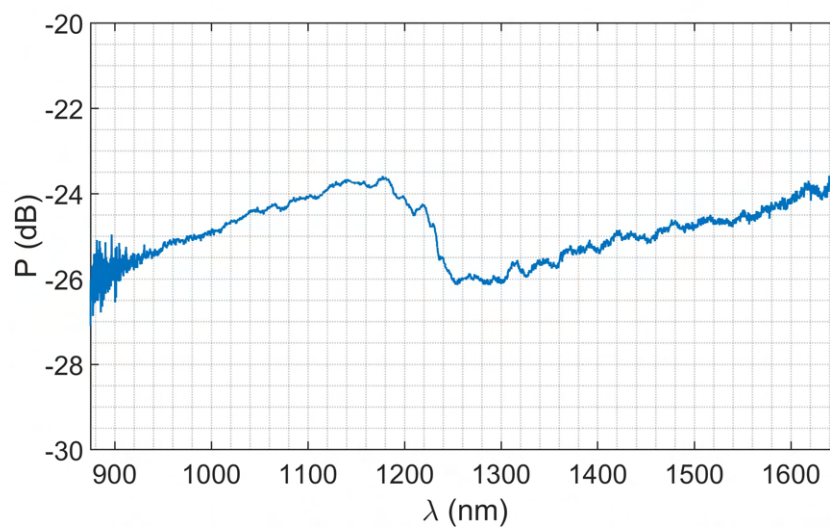


Obrázek B.10: Vývoj výkonových úrovní pro vlnové délky 850, 980, 1300 nm v průběhu měření vzorek 12 využívající taperovaných přechodů.

B.6 Přímé navaření vláken



Obrázek B.11: Spektrální charakteristiky spojení vláken OM1/OM2 o délce 1 m.



Obrázek B.12: Spektrální charakteristiky spojení vláken OM2/SMF 9 μm o délce 1 m.