



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÁ VLÁKNA S DUTÝM JÁDREM

HOLLOW CORE OPTICAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Burian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Radek Burian

ID: 221333

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Optická vlákna s dutým jádrem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor problematiky optických křemenných vláken. Analyzovány budou nejen běžná jedno- a mnoho-vidová vlákna, ale především vlákna s dutým jádrem. V rámci praktické části diplomové práce provede student realizaci a optimalizaci spoje jednovidového vlákna a vlákna s dutým jádrem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BELARDI, Walter, 2019. Hollow Core Optical Fibers. Mdpi. ISBN 978-3039210886.
[2] A. BUCK, John, 2004. Fundamentals of Optical Fibers. Wiley-Interscience. ISBN 978-0471221913.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je studium optických dutých vláken a optimalizace svářecího procesu pro spojení dutého vlákna s jednojádrovým vláknem. V rámci praktické části jsou spoje realizovány pomocí svářecího automatu od firmy Fujikura FSM–100P, na které je sestaven svářecí profil pro zmíněný spoj. Následný svářecí profil je aplikován na různé spojovací metody a byl sledován vliv na změnu zpětného rozptylu v daném spoji.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sváření optických vláken, Optické vlákno, Dutá optická vlákna, svářecí automat Fujikura FSM–100P, Optimalizace svářecího profilu, Svářecí metody.

ABSTRACT

The main goal of this work is to study of optical hollow core fibers and the optimization of the splicing process for interconnection between hollow core fiber and single mode fiber. The splicing automat Fujikura FSM-100P is used in this work. On this automat is created a new splicing profile for our connection. Created splicing profile is applied to various connection methods and has been tracked a considerable impact on reducing backscattering at a splice point.

KEYWORDS

Fusion splicing, Optical fiber, Hollow core optical fibers, Fujikura FSM–100P, Optimization of splicing process Splicing methods.

BURIAN, Radek. *Optická vlákna s dutým jádrem*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Radek Burian
VUT ID autora: 221333
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Optická vlákna s dutým jádrem

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. a ostatním z jeho okolí za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval rodině, která mě během celého studia podporovala.

Obsah

Úvod	12
1 Optická vlákna	13
1.1 Princip optického vlákna	13
1.2 Parametry a jevy limitující optický přenos	14
1.2.1 Disperze	15
1.2.2 Lineární rozptyly	17
1.2.3 Nelineární jevy	17
1.2.4 Nelineární rozptyly	18
1.3 Druhy optických vláken	19
1.3.1 Základní druhy optických vláken	20
1.3.2 Méněvidová (FMF) a vícejádrová (MCF) vlákna	22
1.4 Výroba optického vlákna	25
1.4.1 Výroba preformy	26
1.4.2 Výrobní proces vlákna	26
2 Optická vlákna s dutým jádrem (HCF)	28
2.1 Počátky dutého optického vlákna	28
2.2 Vlákno se zakázaným pásem (PBGF)	31
2.2.1 Princip zakázaného pásu	31
2.2.2 Výrobní proces	32
2.3 Antirezonanční duté vlákno (ARF)	33
2.3.1 Princip antirezonančního vlákna	33
2.3.2 Antirezonančního vlákna s negativním zakřivením	36
2.3.3 Výrobní proces ARF	37
2.4 Aplikace dutého vlákna a jeho porovnání s klasickým vláknem	38
3 Spojování optických vláken	39
3.1 Sváření optického vlákna	39
3.2 Optické konektory	40
3.3 PCF vlákno a svařovací procesy	42
3.3.1 Změna polohy obloukového výboje	43
3.4 ARF vlákno a svařovací procesy	43
3.4.1 Nastavení a změna polohy obloukového výboje	43
3.4.2 Princip založený na úhlu zalomení vlákna	43
3.4.3 Princip založený zúžení optického vlákna	44

4	Vyhodnocení útlumu optického vlákna	45
4.1	Kontrola konektoru	45
4.2	Metody pro měření útlumu	45
4.2.1	Metoda dvou délek	45
4.2.2	Metoda vložných ztrát	46
4.2.3	Metoda OTDR	46
4.2.4	Alternativní metoda měření pro spoj SMF–HCF	46
5	Svařování optického vlákna	48
5.1	Popis svářecího automatu Fujikura FSM–100P	48
5.2	Příprava před svářením	49
5.3	Proces svařování	50
5.4	Spojení SMF vlákna s MMF	51
5.4.1	Sváření se zarovnáním na plášť	52
5.4.2	Kontrola a čištění konektorů	53
5.4.3	Vyhodnocení útlumu spoje SMF–MMF	53
5.4.4	Sváření se zarovnáním na jádro	57
5.4.5	Spojení vlákna SMF a MMF pod různým úhlem zalomení	59
5.5	Spojení dutého vlákna a jednovidového vlákna	61
5.5.1	Vyhodnocení útlumu spoje SMF–ARF	62
5.6	Zúžení optického vlákna	64
5.6.1	Svár zúženého vlákna	65
6	Optimalizace spoje dutého vlákna	67
6.1	Parametry dutého optického vlákna	67
6.2	Spojení jednovidového vlákna s dutým	67
6.2.1	Vyhodnocení útlumu spoje SMF–ARF	71
6.3	Provedení sváru pro zalomení vlákna pod úhlem	73
6.4	Duté vlákno a optimalizace pomocí zúžení vlákna	76
6.5	Optimalizace svářecího procesu pro duté vlákno typu nested ARF	78
6.6	Spojení jednovidového vlákna s dutým skrze mnohavidové vlákno	79
6.7	Alternativní metoda měření útlumu	80
7	Výsledný souhrn práce	83
	Závěr	85
	Literatura	87
	Seznam symbolů a zkratk	92

Seznam obrázků

1.1	Průřez kulatého vlnovodu [2]	13
1.2	Princip šíření optického svazu skrze vlákno [3]	14
1.3	Přeslech symbolů [1]	16
1.4	Druhy vláken [11]	19
1.5	Různé indexy lomu [18]	20
1.6	Jednovidové vlákno [3]	21
1.7	Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu [3]	21
1.8	Gradientní mnohavidové vlákno [3]	22
1.9	Princip SDM skrze MCF a FMF [9]	23
1.10	7jádrové vlákno [19]	24
1.11	Výroba optického vlákna [2]	27
2.1	Podoba prvního fotonického vlákna [34]	29
2.2	7-cell PBGF [34]	29
2.3	První princip ARF vlákna [34]	30
2.4	Vlákno typu NANF [34]	31
2.5	Výroba PCF vlákna [30]	33
2.6	Struktura 1D vlnovodu [24]	35
2.7	Struktura kulatého vlnovodu [24]	35
2.8	Struktura vlákna s negativním zakřivením [24]	36
2.9	ARF tažení preformy [29]	37
3.1	Princip sváření elektrickým obloukem [2]	40
3.2	UPC a APC konektor [32]	41
3.3	ARF napojené na SMF skrze GRIN [40]	44
3.4	Zúžení vlákna [42]	44
4.1	Schéma OTDR [2]	46
4.2	Alternativní metoda měření [44]	47
5.1	Svářecí automat Fujikura FSM-100P	49
5.2	Zachycené stavy různých svárů	51
5.3	Výsledné útlumy jednotlivých svárů pro zaměření na plášť	52
5.4	Kontrola konektoru pomocí sondy napojené na OTDR přístroj	53
5.5	Zapojení pro měření OTDR	54
5.6	Vyhodnocení sváru SMF-MMF pomocí OTDR (1310 nm)	54
5.7	Vyhodnocení sváru SMF-MMF pomocí OTDR (1550 nm)	55
5.8	Schéma OTDR [2]	59
5.9	Sváry se zarovnáním podle jádra (CORE)	59
5.10	Zalomení vláken pod úhlem	60
5.11	Přímá metoda zapojení	60

5.12	Referenční svár vlákna SMF a ARF	62
5.13	Vyhodnocení útlumu pro referenční spoj SMF–ARF vlákno (1550 nm)	63
5.14	Vyhodnocení útlumu pro vlastní spoj SMF–ARF vlákno (1550 nm) .	63
5.15	Zúžené vlákno pomocí automatu FSM–100P	64
5.16	Vlákno před svárem	66
5.17	Zúžené vlákno po svaření	66
6.1	Optimalizace svářecího procesu	68
6.2	A - Poškozená struktura HCF, B - HCF bez poškozené struktury . . .	69
6.3	Optimalizovaný spoj SMF–ARF pro vlnovou délku 1550 nm	71
6.4	Graf pro měření spoje SMF–ARF přímou metodou	73
6.5	Zalomení pod úhlem	75
6.6	Vyhodnocení útlumu při zalomení pod úhlem 10 stupňů	75
6.7	Graf pro získané útlumy a zpětné rozptyly	76
6.8	Spoj SMF–ARF (zúžené) před svárem	77
6.9	A.) Zúžené SMF před svárem, B.) Spojení zúženého SMF s ARF . . .	78
6.10	Spojení SMF–NARF	79
6.11	Princip svářecí metody a vidů skrze GRIN vlákno	80
6.12	Sekundární metoda měření útlumu	81
6.13	Měření útlumu pomocí spektrálního analyzátoru	82
6.14	Měření útlumu SMF–ARF pomocí OTDR	82

Seznam tabulek

5.1	Útlumy SMF–MMF spoje	54
5.2	Tabulka parametrů se zarovnáním podle pláště (CLAD) – 1	56
5.3	Tabulka parametrů se zarovnáním podle pláště (CLAD) – 2	57
5.4	Tabulka parametrů se zarovnáním podle jádra (CORE)	58
5.5	Výsledné hodnoty útlumů pro jednotlivé zalomení	61
5.6	Tabulka zúžení	64
5.7	Nastavované parametry při zúžení vlákna	65
6.1	Výsledná tabulka jednotlivých svárů	70
6.2	Naměřené hodnoty pomocí přímé metody	72
6.3	Nastavené parametry na přístroji OTDR	73
6.4	Tabulka pro různé úhly zalomení	74
6.5	Výsledná tabulka jednotlivých sváru při zúženém SMF	77
6.6	Výsledné hodnoty pro spoj SMF–GRIN–NARF	80
6.7	Výsledná hodnota útlumu dvě různá dutá vlákna	81
7.1	Sestavené svářecí profily pro dutá vlákna	83
7.2	Výsledná tabulka finálních měření	84

Úvod

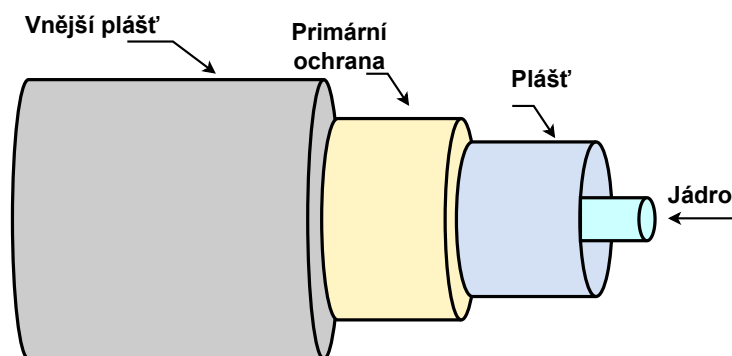
Hlavním tématem práce jsou dutá optická vlákna, která využívají pro přenos optického signálu duté jádro. Tato vlákna jsou známa už několik let, zejména vlákna fungující na principu fotonického krystalu. Nicméně v poslední letech dochází ke zlepšení přenosových vlastností a dutá vlákna vykazují útlum, který je blízký klasickým vláknům. Tato vlákna přenášejí signál od zdroje skrze vzduch, takže fungují na jiném principu než konvenční vlákna. V diplomové práci jsou tedy oba zmíněné druhy vláken rozebrány a vzájemně porovnány.

V teoretické části jsou popsány principy klasických vláken a také jejich parametry, které mohou přenos ovlivnit či limitovat. Kromě tradičního dělení konvenčních vláken na jednojádrová a mnohajádrová je v práci uvedena také zmínka o jejich dalších modifikacích. Dále jsou rozebrána vlákna s dutým jádrem, která se dělí na fotonická vlákna a na antirezonanční vlákna. Kromě principů, na kterých vlákna fungují, jsou v práci rozebrány i některé metody, které se využívají pro propojení dutého vlákna s klasickým jednojádrovým vláknem. Následně jsou v práci uvedeny různé aplikace dutých vláken a jsou také porovnány s klasickým vláknem.

Praktická část se soustředí na sváření pomocí svářecího automatu FSM-100P od firmy Fujikura. Tato svářečka je plně automatická a v případě sváření klasických vláken není potřeba zásahu do nastavení svářecího automatu. Pro naši potřebu byl automat otestován na atypickém spoji, kdy došlo ke sváření jednojádrového vlákna s mnohajádrovým vláknem. V tomto případě nevyhovoval žádný z přednastavených profilů a byl tedy vybrán jeden, který byl následně optimalizován pro získání minimálního útlumu na zmíněném spoji. Kromě sestavení svářecího profilu jsem v práci vyzkoušel změny útlumu při sváření pod jiným úhlem než nula stupňů. Pro vyhodnocení útlumu jsem vycházel z přímé metody a metody založené na zpětném rozptylu (OTDR). Hlavní náplní práce je optimalizovat svár z jednojádrového vlákna na duté optické vlákno. Jako referenční spoj je využito vlákno, které pochází z laboratoře UFE v Praze. Veškeré hodnoty jsou tedy porovnány s tímto referenčním spojem. Cílem práce bylo nejen optimalizovat spoj, ale také vyzkoušet některé z uvedených spojovacích metod, které mají vést ke zlepšení přenosových vlastností daného spoje.

1 Optická vlákna

Optický přenos se stává v posledních letech nedílnou součástí našich běžných životů. V telekomunikacích to byla celkem nákladná možnost, jak šlo přenášet data skrze síť. Nasazení tedy bylo spíše v páteřních sítích nebo v mezikontinentálním spoji. Dneska už je celkem běžná instalace optického kabelu k zákazníkovi. Díky vlastnostem optických spojů máme nástroj, jak rychle a spolehlivě řídit tok dat, který se stále zvětšuje. Proto se také na vývoj optického přenosu kladou vysoké nároky. Kromě využití v telekomunikacích se můžeme setkat s optickým vláknem třeba v senzorce, například pro měření teploty. První princip optického kabelu byl demonstrován v roce 1841. Dnes dominuje spíše optické vlákno válcového typu (obr. 1.1), které se ve většině případů nasazuje v telekomunikacích. Nicméně je dobré zmínit, že existují také planární světlovody. Ty jsou hranaté a jejich nasazení není tak časté, využívají se například v integrovaných fotonických strukturách [1] [5].



Obr. 1.1: Průřez kulatého vlnovodu [2]

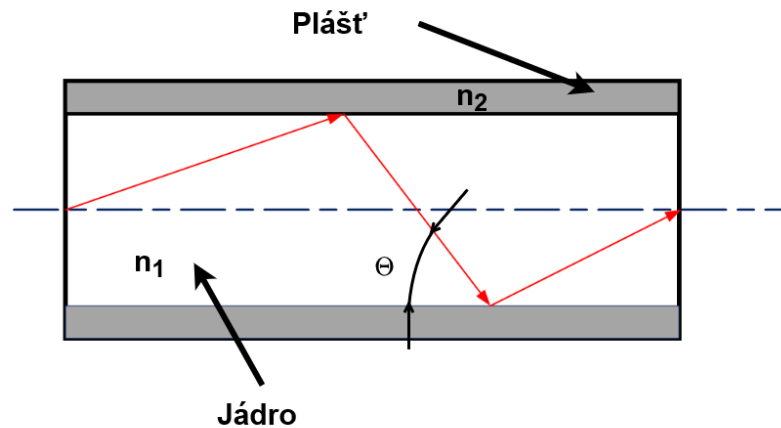
1.1 Princip optického vlákna

Přenos světelných paprsků skrze vlákno vychází ze základů optické geometrie. Světlo od zdroje je navázáno do optického vlákna, kde se pomocí paprsků skrze něj šíří až na konec. Oblast optického záření je dána od 100 nm do 1 mm a dělí se na tři základní oblasti: ultrafialová, světelná a infračervená. V případě optické komunikace dochází k využití vlnové délky kolem 10 μm . Ovšem optický přenos využívá mez 0,4 až 1,7 μm , kvůli nejlepším přenosovým parametrům. Princip šíření světla skrze optické vlákno je založen na indexu lomu [2] [3]:

$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (1.1)$$

Veličina c určuje rychlost světla ve vakuu a v je rychlost světla v daném prostředí. Výsledkem vztahu bude bezrozměrná hodnota (vždy větší než jedna), která popisuje,

o kolik je rychlost světla v daném prostředí menší než rychlost světla ve vakuu. Na základě indexu lomu se v optických vláknech využívá tzv. totálního odrazu. Totální odraz nastává na rozhraní dvou optických prostředí s rozdílným indexem lomu. Na obrázku níže je ilustrován možný průchod světelného paprsku skrze vlákno.



Obr. 1.2: Princip šíření optického svazu skrze vlákno [3]

Pro totální odraz musí být splněna podmínka, že index lomu jádra $n_1 > n_2$. Jestliže paprsky vstupují pod úhlem menší než Θ ($\Theta = \frac{n_2}{n_1}$), potom dochází k totálnímu odrazu [2] [3].

1.2 Parametry a jevy limitující optický přenos

Pro základy optického přenosu je podstatné znát parametry, které mohou ovlivnit přenos. Optická vlákna procházejí vývojem už několik let, a tak není překvapením, že se hodnoty u sledovaných parametrů neustále zlepšují (útlum, rychlost, odolnost vůči ohybu a nelineárním jevům). Nicméně u běžně používaných vláken narážíme na jejich limity, které není možné eliminovat [1] [2]:

Šířka pásma

Šířka pásma je udávána v MHz · km. Je to v podstatě hranice od spodní frekvence k horní, ve které probíhá přenášení signálu. Optický přenos nabízí velkou šířku pásma, to je výhodné hlavně vzhledem k růstu přenosové kapacity. Šířka pásma může být závislá na konstrukci, materiálu optického vlákna a také na vlnové délce [1] [2].

Útlum

Je jeden z prvních parametrů zkoumaný v optickém přenosu. V optice rozeznáváme útlum v dB a také měrný útlum v dB/km. Útlum nám udává ztráty od zdroje záření skrze přenosovou cestu až na konec přijímače. Měrný útlum udává ztráty vztažených na jednotku délky, obvykle km. Útlum nemusí být jenom vlastností vlákna, ale také třeba sváru, spojky. Je vyjádřen logaritmickým vztahem [1]:

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad [dB] \quad (1.2)$$

kde P_1 je vstupní výkon, P_2 je výstupní výkon. Současná hodnota měrného útlumu klasických vláken je pod 0,2 dB/km [1].

Numerická apertura

Tato bezrozměrná veličina nám určuje úhel, pod kterým je nutné navázat optický signál do vlákna, tak aby nedocházelo k vyvázání signálu mimo jádro. Hodnota numerické apertury je dána vztahem [2]:

$$NA = \sin\Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad [dB] \quad (1.3)$$

Je to bezrozměrná veličina, kde n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště [2].

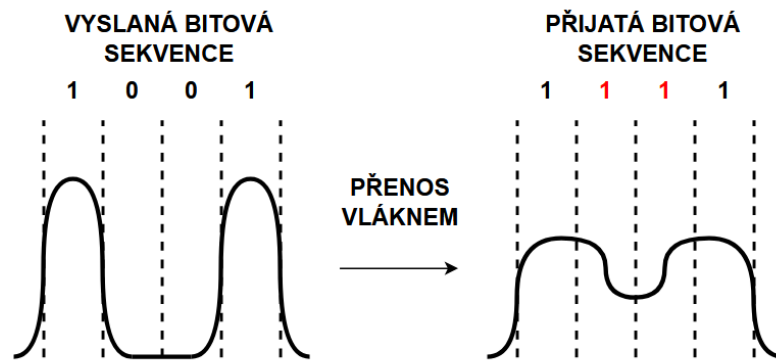
Ohyby

Optické vlákno je citlivé na ohyby. V případě většího ohybu může dojít k tomu, že se odražený paprsek dostane až do pláště. Obvykle je v parametrech hodnota, která nám udává minimální poloměr ohybu. V případě ohybu dochází také k nárůstu útlumu. Ztráty v důsledku ohybu můžeme dělit na: ztráty na makroskopických neregularitách, ztráty způsobené mikroohyby a makroohyby. Mezi **makroskopické neregularity** patří makronečistoty, vzduchové bublinky, trhlinky v materiálu a také vady na hranici mezi jádrem a pláštěm. Tyto ztráty lze omezit výrobní technologií. **Mikroohyby** jsou způsobené při výrobě nebo působením okolních vlivů, které mohou deformovat plášť kabelu. Patří mezi ně třeba poruchy přímočarosti osy vlákna a malé chyby v geometrii vlákna. Mohou se vyskytovat v celé délce vlákna a značně ovlivnit jeho útlum. Do **makroohybů** již zmíněné klasické ohyby vlákna, například způsobené špatnou manipulací s ním[2].

1.2.1 Disperze

Zvýšením modulační rychlosti dochází k poškození modulační obálky optického signálu. Se zvýšením modulační rychlosti dochází ke snížení bitového intervalu a také

ke zkrácení jednotlivých impulzů. Pulzy se následně roztahují a dochází k vzájemnému překrytí. V případě překrytí je potom na přijímací straně problém rozpoznat vysílanou sekvenci, viz. obrázek 1.3, kde vysílaná sekvence 1001 byla rozpoznána jako 1111 [1].



Obr. 1.3: Přeslech symbolů [1]

Mezi zástupce optické disperze patří: vidová disperze, chromatická disperze a polarizační disperze [1][2].

Vidová disperze

Tento druh disperze je často spojován s vlákny, které přenáší více vidů. Šíří-li se vlákem více vidů, dochází na konci vlákna ke zpoždění každého z nich. Každý vid v průběhu přenosu skrze vlákno putuje vlastní cestou. Vidová disperze může mít vliv například na rychlost přenosu, mezní šířku pásma a také může omezit vzdálenost. Snížit vidovou disperzi můžeme například použitím vlákna s gradientní změnou indexu lomu [1] [2].

Chromatická disperze

Od zdroje záření se šíří světlo, které má několik vlnových délek. Každá vlnová délka má odlišný index lomu, tím pádem opět dochází k roztažení přijímaného signálu na přijímači. Tato disperze se objevuje při přenosu jednoho vidu a lze omezit výběrem zdroje. Obvykle bývá mnohonásobně menší než vidová. Na vlnové délce 1310 nm je nulová a na 1550 nm může omezit přenosové vlastnosti vlákna [1] [2].

Polarizační vidová disperze

Tento druh disperze je běžný u jednovidových vláken a opět při ní dochází ke zkreslení signálu na přijímací straně vůči vyslanému signálu. Světlo se šíří skrze jedno-

vidové vlákno ve dvou na sobě kolmých polarizačních rovinách. Ve výsledném stavu se může světlo v jedné rovině šířit pomaleji a tím dojde ke zpoždění signálu. Tato disperze se oproti ostatním vyskytuje minimálně [1] [2].

1.2.2 Lineární rozptyly

Rayleighův rozptyl

Jev je způsoben mikronehomogenitami, které jsou náhodně rozmístěné a jsou malé oproti vlnové délce. Při průchodu signálu vláknem může optický paprsek narážet na tyto hmoty jádra a dochází k lomům, odrazům. Odrazy se následně šíří všesměrově mohou se ztratit v plášti vlákna. Rozptyl je zásadní zhruba někde kolem vlnové délky 800 nm, pak je přenos neuskutečnitelný. Nejmenší vliv rozptylu na přenos je kolem vlnové délky 1550 nm a dál. [2] [13].

Mieův rozptyl

Tento jev je hodně vzácný, protože je odstranitelný při výrobě. Je způsoben nerovnoměrnostmi a nehomogenitami materiálu. Jde o rozptyl elektromagnetického záření, jehož částice jsou srovnatelné s vlnovou délkou [1] [13].

1.2.3 Nelineární jevy

Nelineární jevy ovlivňují přenos skrze optické vlákno negativně. Pro jejich výskyt stačí překročení prahové hodnoty vysílaného výkonu. Rozlišujeme jevy druhého a třetího řádu. Kromě dvou zmíněných skupin pak rozeznáváme také nelineární rozptyly. Níže jsou popsány jevy, které se v optickém přenosu nejčastěji vyskytují. Základní dělení optických nelineárních jevů a jejich zástupců vypadá následovně [1] [14]:

- **Jevy druhého řádu:** Generování druhé harmonické (SHG), generování součtové frekvence (SFG) a generování rozdílové frekvence (DFG).
- **Jevy třetího řádu:** Generování třetí harmonické (THG), vlastní fázová modulace (SPM), čtyřvlnné směšování (FWM) a křížová modulace.
- **Nelineární rozptyly:** Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl.

Vlastní fázová modulace

Je způsobená fázovou modulací světla či zapříčiněná okamžitou změnou intenzity světla a vede k postupnému rozšiřování spektra signálu. Dochází při ní ke změně indexu jedním samostatným pulzem. Ve vláknech může být jev dominantní v případech

vysokého výkonu a nízké chromatické disperze. Jev se dá regulovat pomocí úpravy vysílaného výkonu do vlákna [1] [15] [16].

Křížová fázová modulace

V tomto případě může vlnová délka světla ovlivnit fázi jiné vlnové délky světla. S jevem se můžeme setkat například u klasického vlnového multiplexu, kde se začne překrývat jeden nebo více pulsů vzájemně. Jev se dá limitovat optickým výkonem a pomocí disperze [1][16].

Čtyřvlnné směšování

Jev je častý u hustého vlnového multiplexu. Dochází při něm ke vzniku čtvrté frekvence, která vzniká v důsledku interakce mezi dvěma nebo třemi dalšími vlnovými délkami. Použitím vhodného vlákna (vlákno s nenulovou posunutou disperzí) dokážeme jev limitovat, vlákna s posunutou disperzí nejsou pro tyto účely vhodné, protože splňují fázovací podmínku pro čtyřvlnné směšování [1] [16].

1.2.4 Nelineární rozptyly

Pro nelineární rozptyly je charakteristické, že výkon od zdroje, který je navázán do optického vlákna, musí překročit prahovou hodnotu. Prahová hodnota je pak pro oba rozptyly různá. V případě nelineárního rozptylu se tedy v přenosu vytvoří nový výkon na jiné vlnové délce, než je vlnová délka zdroje. Při překročení prahové hodnoty výkonu se jevům říká stimulovaný Ramanův rozptyl a stimulovaný Brillouinův rozptyl. Omezit je tedy lze limitováním optického výkonu [1] [16].

Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl vzniká při interakci fotonu s atomem nebo molekulami materiálu. Výkon Ramanova rozptylu je nižší oproti Brillouinovu rozptylu. Ramanův rozptyl se šíří směrem vysílaného signálu, přičemž mění jeho vlnovou délku. Dále se může šířit také zpět ke zdroji, takže je všesměrový. Může způsobit problémy u optického přenosu skrze multiplex, ale také nachází kladné využití například Ramanově zesilovači, který rozptylu využívá ve svůj prospěch [1].

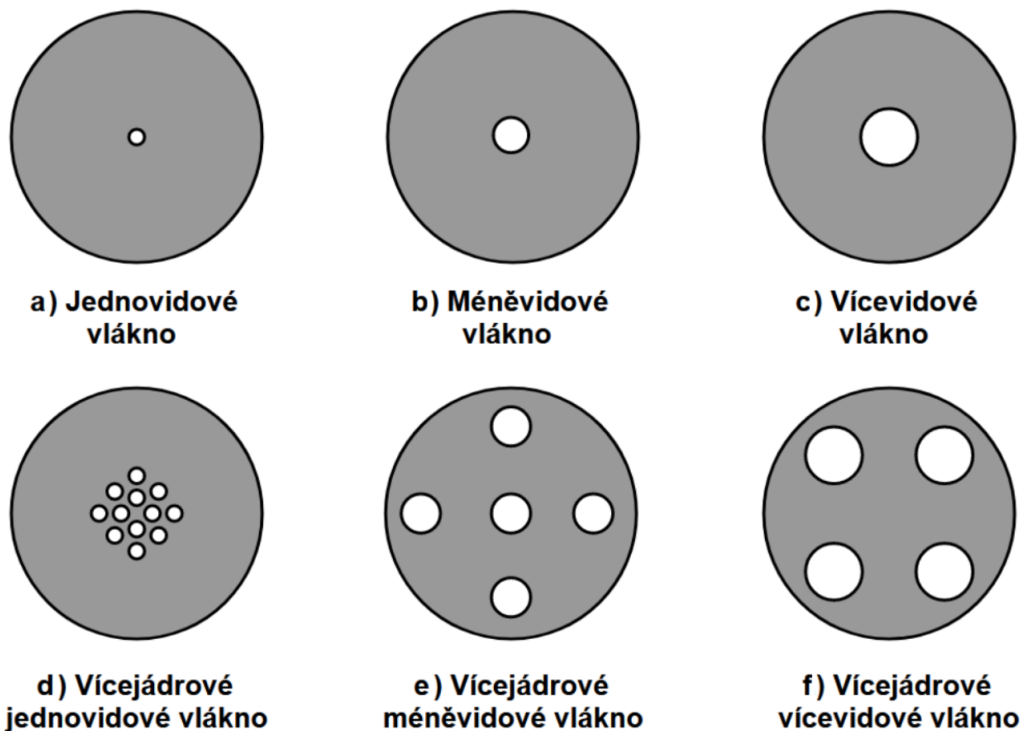
Brillouinův rozptyl

V tomto případě dochází v důsledku vysoké intenzity ke vzniku akustické vlny, která se šíří pouze zpět ke zdroji. Brillouinův rozptyl může limitovat optický přenos,

protože při zvýšení výkonu dojde k překročení prahové hodnoty a přenos bude rychlostně omezen. V případě optického přenosu se bude totiž přebytečný výkon odrážet zpět ke zdroji optického signálu [1].

1.3 Druhy optických vláken

Běžná konvenční optická vlákna z pohledu způsobu vedení světla vláknem dělíme na vlákno jednovidové SMF (Single Mode Fiber) a vlákna vícevidová MMF (Multimode Fiber). Vlákna můžeme dělit ale také podle jejich materiálu: Obvykle jsou vlákna tvořena z křemíku. Levnější variantou jsou vlákna plastová, ta mají ale horší útlum a z toho důvodu se používají spíše k speciálním aplikacím a přenosu audia. Jednovidová a mnohavidová vlákna jsou běžně známá, nicméně existují také další druhy vláken, které vycházejí z těchto skupin a je vhodné je alespoň zmínit. Cílem těchto vláken je zefektivnit a zrychlit optický přenos. Jedním z takových vláken je vlákno méněvidové FMF (Few Mode Fiber), které je v podstatě výplní mezi SMF a MMF vláknem. Má o něco větší průměr jádra než SMF, ale oproti MMF výrazně menší. Další kategorie je spíše rozšířením těchto tří skupin a označuje tzv. vícejádrová vlákna MCF (Multi Core Fiber). Tato vlákna umožňují zvýšit teoretickou rychlost kolem 1000 Tbit/s. Na obrázku níže je zobrazena možná podoba takových druhů vláken [4] [5] [11].

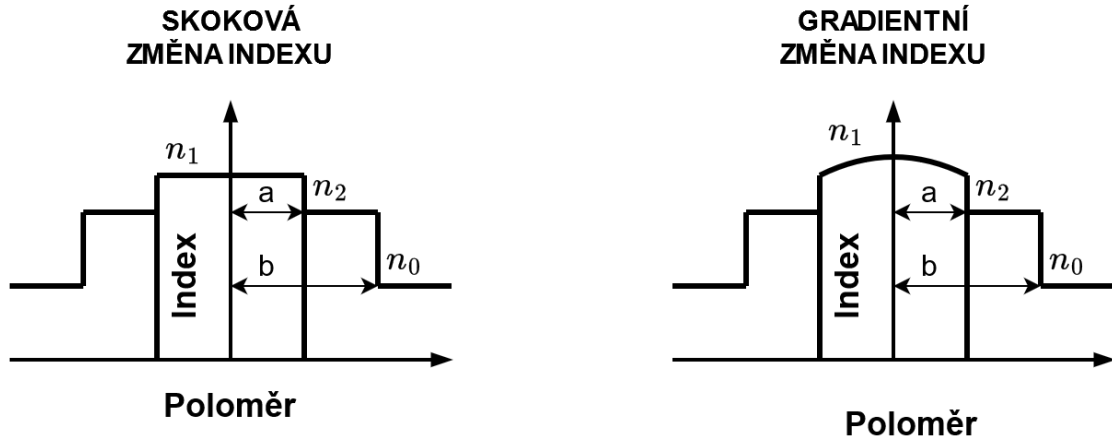


Obr. 1.4: Druhy vláken [11]

1.3.1 Základní druhy optických vláken

Základní dělení je dáno podle geometrického profilu vlákna. Dle něho rozlišujeme dva druhy [18]:

- Profil se skokovou změnou indexu
- Profil s gradientní změnou indexu



Obr. 1.5: Různé indexy lomu [18]

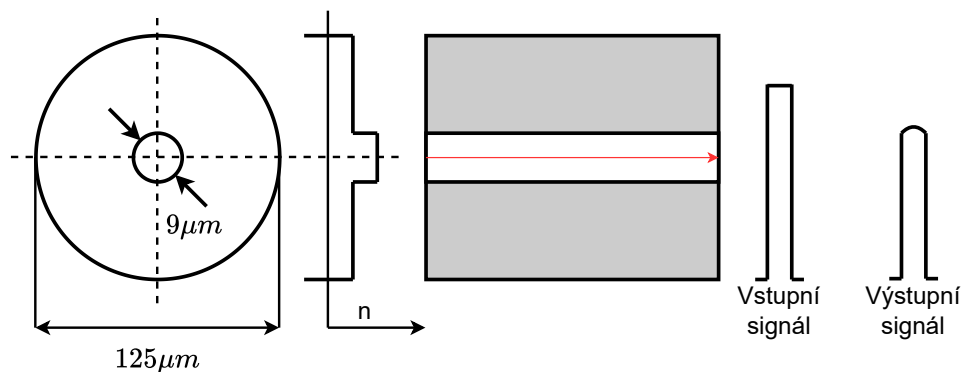
Na obrázku vidíme průměr jádra $a \approx 10\mu m$, průměr jádra s opláštěním $b \approx 62,5\mu m$. Písmena n značí index pro různé oblasti (jádra, pláště a ochrana). Vedení světla je možné za předpokladu, že je průměr jádra větší než vlnová délka světla.

U vláken s gradientní změnou indexu se postupně index lomu uvnitř jádra zmenšuje. Průběh indexu lomu je závislý na poloměru. Pro **vlákna se skokovou změnou indexu lomu** platí: $n(r) = n_1$ pro $|r| \leq a$ nebo $n(r) = n_2$ pro $|r| \geq a$.

V případě **gradientní změny indexu** platí: $n(r) = n_1 \cdot [1 - \Delta(r/a)^\alpha]$ pro $|r| \leq a$ a $n(r) = n_2$ pro $|r| \geq a$. Kde α značí tvar indexového profilu, r je radiální vzdálenost paprsku od osy a písmenko a značí poloměr jádra [18].

Jednovidové vlákno (SMF)

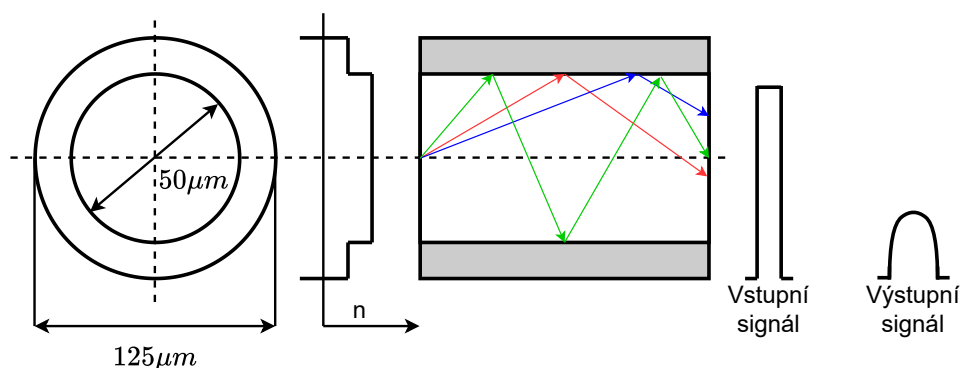
Je klasické vlákno podporující pouze základní vid na delší vzdálenosti ($V < 2,405$). Parametr V nám říká, kolik vidů může putovat optickým vláknem. Vlákno má obvykle menší průměr jádra, zhruba $5-10\mu m$. Nevýhodou malého jádra je horší navázání optického svazku do vlákna. Jako zdroj se využívá spíše laser, který má úzkou spektrální čáru. [2] [3].



Obr. 1.6: Jednovidové vlákno [3]

Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu

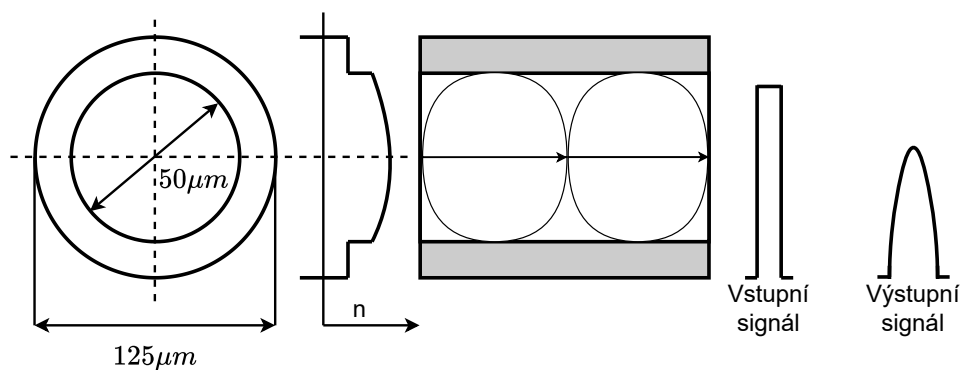
Při zvětšování jádra platí podmínka $V > 2,405$. Tento druh vlákna dokáže přenášet v jednom momentě více různých vidů. Obecně se mnohavidová vlákna využívají pro přenosy na krátké vzdálenosti. Průměr jádra se pohybuje od 50 do 100 μm , snadněji lze tedy do vlákna navázat svazek. Tento druh vlákna je limitován právě disperzí, která ovlivňuje šířku pásma (asi 50 MHz/km) [2] [3].



Obr. 1.7: Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu [3]

Gradientní mnohavidové vlákno

Způsob šíření je odlišný od předchozího vlákna, vidy se šíří v podobě paraboly (dle vztahu: $a_s = \frac{a_1 + a_2}{2}$). Z předešlé rovnice plyne, že index lomu s rostoucí vzdáleností klesá. Jednotlivé vidy dorazí na konci vlákna v přibližně stejném čase. Vlákno umožňuje snížení disperze a přenáší přibližně o polovinu vidů méně. Užití je na středně velké vzdálenosti a pro multiplexní přenosy s průměrem jádra, který je shodný s průměrem předešlého typu [2] [3].



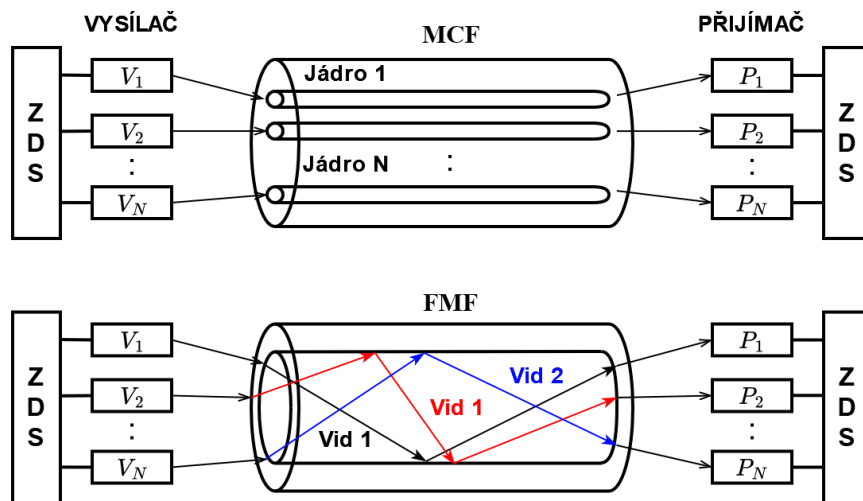
Obr. 1.8: Gradientní mnohavidové vlákno [3]

1.3.2 Méněvidová (FMF) a vícejádrová (MCF) vlákna

Jedním z používaných multiplexů WDM (Wavelength-Division Multiplexing) pro klasická vlákna je vlnový multiplex. Stručně řečeno, jde o dělení na základě vlnové délky. Na straně vysílače dochází pomocí multiplexoru ke sjednocení jednotlivých optických přenosů, které následně cestují skrze společné optické vlákno k přijímači. Na straně přijímače dochází k rozdělení jednotlivých vlnových délek. Také se v optickém přenosu využívá technika založená na časovém dělení prostoru (Optical Time-Division Multiplexing). Zde probíhá komunikace skrze vyhrazené časové okénka, které se v průběhu přenosu jednotlivě střídají. Dále je také využívána technika prostorového dělení SDM (Space Division Multiplexing), ta nám umožní spolu s vícejádrovým vláknem zvýšit přenosovou rychlost a reagovat tak na neustálý růst datového toku. Technika SDM v souvislosti s vlákny FMF a MCF je rozebrána v podkapitole níže [9].

Multiplex na základě dělení prostoru (SDM)

Tato technika využívá prostorové dělení a vytváří několik paralelních prostorových kanálů pro komunikaci. Dnes je to již běžná technologie využívaná v bezdrátových sítích, konkrétně při technologii MIMO (Multi-Input Multi-Output). Na straně vysílače a přijímače jsou minimálně dvě antény, které umožňují komunikaci více zařízení v jeden moment. V optických sítích se využívá s polarizačním multiplexováním skrze klasické optické vlákno. Následně se počítá využití při komunikaci skrze vícejádrová a také méněvidová vlákna [7].



Obr. 1.9: Princip SDM skrze MCF a FMF [9]

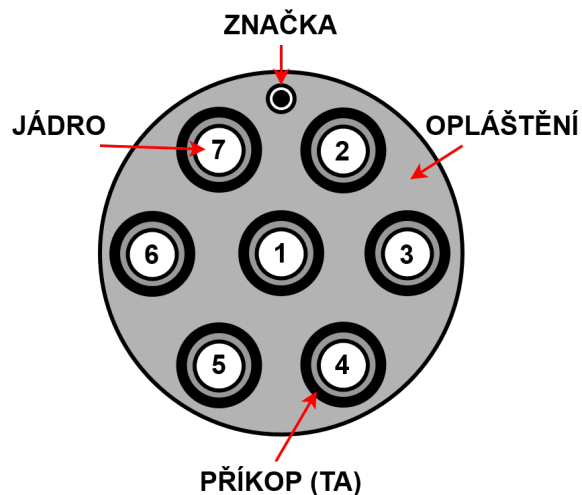
V případě obrázku 1.9 je popsán princip technologie SDM skrze vícejádrová a méněvidová vlákna. Blok ZDS se stará o digitální zpracování signálu, blok V značí jednotlivé přenosy vstupující do vlákna a blok P označuje jednotlivé přenosy na straně přijímače [9].

S využitím SDM techniky lze dosáhnout mnohem větších přenosových rychlostí a tím pádem dochází ke zvýšení přenosové kapacity na větší vzdálenost. Abychom mohli zvýšit rychlost nebo provádět přenos na delší vzdálenost, je potřeba zvýšit vysílací výkon. V případě klasického jednovidového vlákna dochází se zvyšováním optického výkonu ke generování nelineárních jevů. Tedy narážíme na limity, které omezují přenos. Tento kapacitní limit je někde kolem 100 Tbit/s. Limit se povedlo překročit v roce 2012 pomocí 19ti jádrového vlákna na vzdálenost 10,1 km. Naměřený kapacitní limit experimentu byl 305 Tbit/s. Další roky byl kapacitní limit překonán pomocí 12ti jádrového vlákna. První experiment vykazoval limit kolem 1 Pbit/s a druhý až 1 Ebit/s. Následně se začalo pracovat na tzv. hustém SDM (DSDM – Dense Space Division Multiplexing), které počítá s použitím 30ti a více jader. Při zvýšení počtu jader dochází k přeslechům mezi jádry a také je vhodné, aby si vlákno zachovalo svou pevnost a spolehlivost. V roce 2014 bylo provedeno první měření s technikou DSDM, kde bylo použito 12ti jádrové vlákno se třemi vidy. Při dálkovém přenosu skrze vícevidové vlákno je potřeba vyřešit skupinové zpoždění jednotlivých vidů a ztrátový rozdíl mezi nimi. V roce 2015 byl realizován experiment na 527 kilometrech. V roce 2016 se podařilo přesáhnout přenos nad 1000 kilometrů pomocí vícejádrového vlákna s nízkým přeslechem mezi kanály [9].

Vícejádrová vlákna (MCF)

Vícejádrová vlákna se dělí na dva druhy, jedním z nich je tzv. spřažené vícejádrové vlákno (coupled-MCF) a druhým tzv. nespřažené (uncoupled-MCF). První vlákno, které mělo více jader bylo 7mi jádrové vlákno (7-MCF). Postupem času se počet jader rozšířil až na 32 pod jedním opláštěním. Zde je potom důležitá rozteč, která v případě hustého rozmístění může klesnout až na $20 \mu\text{m}$. Tím se dostáváme k tzv. coupled vícejádrovým vláknům, kde je rozteč mezi jádry minimální. V tomto případě elektrické pole ovlivňuje ostatní jádra, nikoliv pouze to své a z toho důvodu jeho vidy nazýváme jako super vidy [18] [19].

Uncoupled vícejádrová vlákna – u takového druhu je důležité rozmístění jednotlivých jader. Vlákna jsou pod jedním opláštěním rozmístěna tak, aby zde vznikalo minimální ovlivňování mezi jednotlivými jádry. Jako první vícejádrové vlákno bylo sestrojeno vlákno obsahující 7 jader, viz obrázek 1.10. Na něm je vidět průřez vláknem a pro identifikaci jednotlivých jader slouží značení (marker). Vznik 7jádrového vlákna je datován k roku 2011 a bylo z čistého křemíku. Pro snížení přeslechu mezi jádry je každé jádro obklopeno tzv. příkopem (TA – trench-assisted). Na vlákně byly naměřeny hodnoty útlumu $0,175\text{--}0,181 \text{ dB/km}$ na jedno vlákno pro vlnovou délku 1550 nm . Na celém pásmu C+L ($1530\text{--}1625 \text{ nm}$) byly evidovány hodnoty útlumu kolem $0,202 \text{ dB/km}$. V roce 2017 bylo vytvořeno vlákno čítající 32 jader pod jedním opláštěním. Obsahovalo rozdílné indexy kvůli minimalizaci rušení mezi jednotlivými jádry. Na vlnové délce 1550 nm byl naměřen útlum $0,24 \text{ dB/km}$ [19].



Obr. 1.10: 7jádrové vlákno [19]

Coupled vícejádrová vlákna – snižováním mezery mezi jednotlivými jádry dochází k přenosu optického výkonu mezi jádry. Pole vidů není závislé pouze na jednom jádru, ale bude distribuováno do všech ostatních jader. Ve vlákně vznikají

zmíněné super vidy. Jedním ze super vidů je LP_{01} , které má dva režimy. Jeden je symetrický a druhý antisymetrický. Další super vid je LP_{11} , ten má čtyři degenerativní vidy. Na základě teorie vidů věříme, že super pole je lineární kombinací vlastních vidů pro každé jádro s určitou váhou. První vlákno tohoto typu bylo prezentováno v roce 2012. Vlákno mělo tři homogenní jádra s průměrem $12,4 \mu m$. Na vlnové délce 1550 nm byl naměřen útlum 0,181 dB/km. V roce 2014 bylo představeno vlákno s devíti jádry po třech ve skupině a vykazovalo útlum přibližně 0,19 dB/km [19].

Méněvidová vlákna (FMF)

Tento druh vlákna je taková mezivýplň současných, protože má větší průměr jádra než jednovidové vlákno a menší průměr jádra než vícevidové. Může přenášet 10 až 20 vidů, také je ale běžně používané vlákno pro 2 až 6 vidů. Vlákno může obsahovat několik režimů, včetně základního. Reálně vlákno obsahuje mnohem více režimů, když se počítá s různými směry. Například vlákno o dvou videch může mít až 6 různých vidů s ohledem na degeneraci a polarizaci [20].

Tato vlákna najdou využití například v telekomunikacích, kde spolu s SDM technikou dokážou neustále navyšovat kapacitu optického přenosu. Používají se vlákna se skokovou změnou indexu a také s gradientní změnou. Gradientní jsou možná výhodnější, protože vykazují menší zpoždění jednotlivých vidů. Je potřeba také počítat s možnostmi nelineárních jevů a rozptylů. Kromě použití v telekomunikacích je možné vlákno využít i pro senzorické měření více bodů [20].

1.4 Výroba optického vlákna

Výroba optického vlákna je velmi nákladný a také náročný proces, při kterém je třeba dodržovat extrémně čisté prostředí. Při špatném výrobním procesu mohou vznikat odrazy, rozptyly atd. Pro dosažení nejlepších parametrů vlákna je celý proces výroby monitorován [6].

K výrobě vlákna je vhodné volit materiál, který vykazuje minimální útlum pro naši pracovní vlnovou délku. Obvykle to bývá čisté křemičité sklo, které má v infračervené oblasti minimální útlum (1550 nm). Před výrobou je také vhodné minimalizovat obsah vody. V oblasti nízkého útlumu se nacházejí OH ionty (zbytky vody), které jsou dány vlastností materiálu. Index lomu jádra musí být o 1 % větší než index lomu pláště. Toho lze docílit přidáním příměsí například Germania [6].

Preformou je skleněná trubice, ze které je následně taženo samostatné vlákno. Z největší délky preformy lze táhnout vlákno dlouhé až po několik set kilometrů. Obvyklé parametry preformy jsou 1 až 5 cm pro průměr jádra a délky obvykle od

30 cm až několik set metrů. Obrázek níže 1.11 přibližně ilustruje výrobní proces klasického vlákna [6].

1.4.1 Výroba preformy

Metoda vnější depozice OVD – Outside Vapor Deposition

Postupně se na podložku (keramické nebo grafitové tyčky) napalují vrstvy sazí z daného materiálu. Proces se opakuje, dokud nedosáhneme požadované tloušťky materiálu. Veškerá napálená vrstva se z podložky sundá a zahřeje. Zahřátím se smrskne do tvaru tyčky (preformy) [2].

Vnitřní depozice MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition

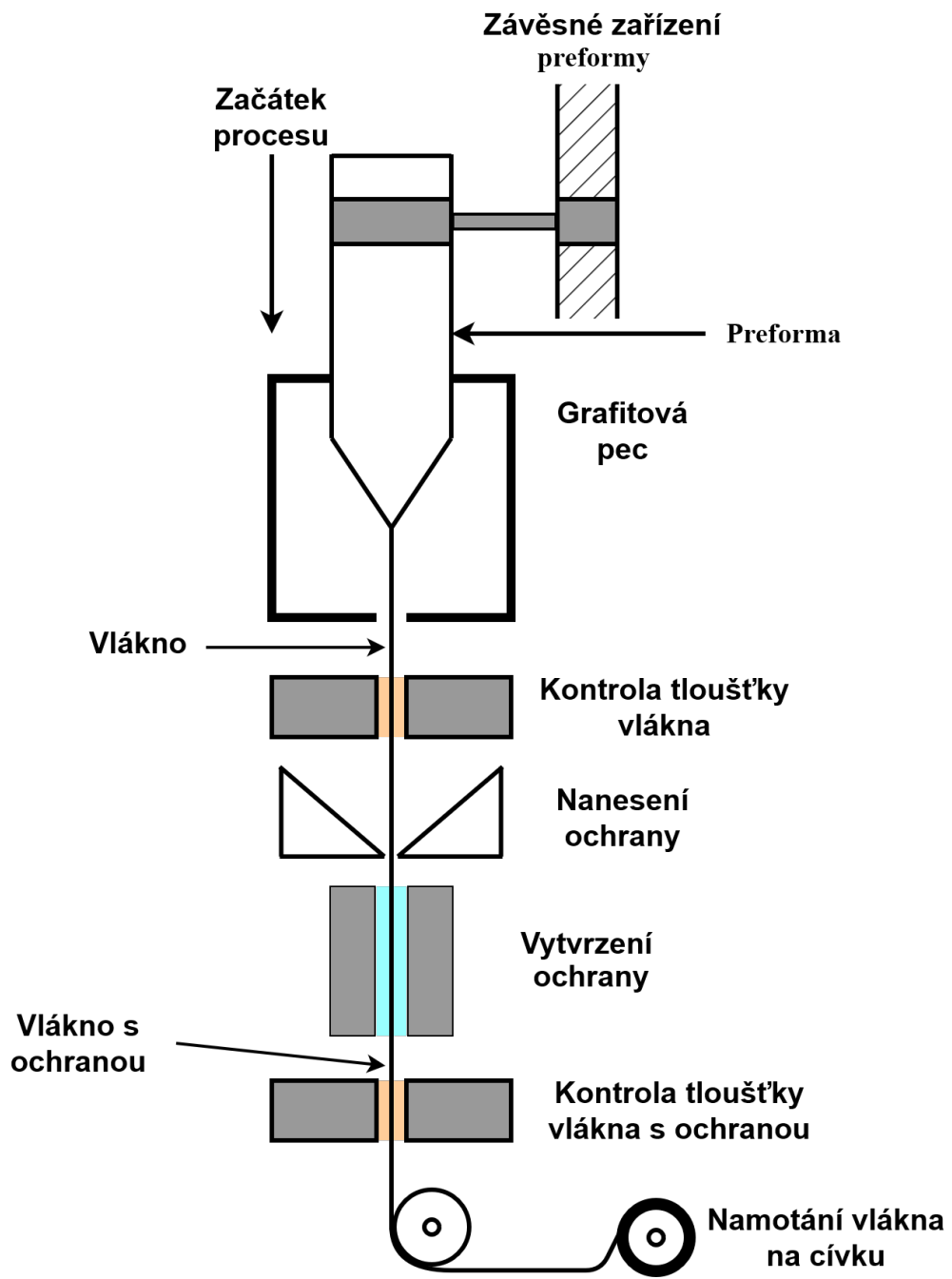
Proces vychází z metody OVD, jen se saze napalují z vnitřní strany trubice (syntetického křemene), ta zároveň slouží jako budoucí plášť vlákna. V tomto případě se po nanesení dostačujících vrstev opět zahřeje celá trubice, která se smrští do tvaru tyčky [2].

Axiální depozice VAD – Vapor Axial Deposition

Saze se napalují na rotující terč v axiálním směru. Materiál se postupně napaluje směrem ke středu terče. Tím dochází ke vzniku jádra a pláště, jejichž rozměry lze snadno měnit [2].

1.4.2 Výrobní proces vlákna

Preforma je uchycena v posuvném držáku, ten má posouvat preformu směrem dolů v případě jejího úbytku. Na konci preformy dochází k jejímu nahřátí pomocí pece. Potřebná teplota pro tažení preformy je 2000 °C. Při takové teplotě se preforma rozehřeje a je možno začít tahat vlákno. Hned po tažení z preformy je tloušťka vlákna měřena. Tloušťka se dá ovlivnit rychlostí tažení. Dále se na vlákno nanese primární ochrana, která se nechá ještě vytvrdit pomocí UV záření. Před navinutím na cívku projde vlákno s primární ochranou opět měřícím prvkem, kde se měří tloušťka vlákna s ochranou [2] [6].



Obr. 1.11: Výroba optického vlákna [2]

2 Optická vlákna s dutým jádrem (HCF)

Tento druh vláken využívá pro přenos signálu vzduchové jádro. Vlákna se označují zkratkou HCF (Hollow Core Fibers). Svoji pozornost si získávají až posledních pár let. Vlákna s dutým jádrem jsou známa od konce 19. století, ale pro tehdejší potřeby byla využívána spíše klasická vlákna s pevným jádrem. Výrobní proces byl u vláken s pevným jádrem mnohem jednodušší, méně nákladný a sledované parametry mnohem výhodnější. V poslední době však dochází ke zlepšení parametrů u vláken s dutým jádrem, nicméně pořizovací cena je značně vyšší. Vlákna s dutým jádrem přináší možnost vyšší rychlosti na větší vzdálenosti bez použití zesilovačů na trase, vyšší přenosovou rychlost, menší ztrátovost, větší bezpečnost a také odolnost vůči nelineárním jevům. V případě telekomunikací mají být přínosem pro oblasti s vyšším datovým tokem, například v datacentrech [12] [17].

Při přenosu optického signálu klasickým vláknem s pevným jádrem musí platit, že index lomu jádra musí být větší než index lomu pláště. Zároveň index lomu jádra nemůže být menší než 1. U dutých vláken však existují mechanismy, které umožňují přenos bez těchto podmínek. Jednou z možností je využití principu zakázaného pásu (PBG – Photonic Band Gap), který může být realizován ve fotonickém vlákně (PCF – Photonic Crystal Fiber). Další možností je využití vláken s principem anti-rezonance (ARF – Antiresonant Fiber). Tyto možnosti budou následně důkladněji popsány v dalších kapitolách [21].

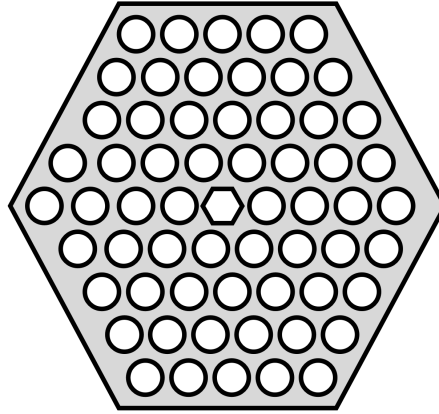
2.1 Počátky dutého optického vlákna

První zmínky o možnosti přenášet vlny skrze vzduchové jádro pocházejí přibližně z konce 19. století od J. Thomsona a L. Rayleigha. V Bellově laboratoři vznikl dutý vlnovod s metalickým opláštěním pro přenos vln na krátké vzdálenosti. Útlum vlnovodu byl dvojnásobný oproti předpokladu. Příčinou byly ztráty způsobené ohybem. Poté přišel nástup optických vláken s pevným jádrem [12].

Opravdová první dutá optická vlákna vznikají kolem roku 1980. Navržená konstrukce dutého jádra s kovovým opláštěním pracovala na vlnové délce $10,63 \mu\text{m}$ a vedla signál z CO₂ laserů. Vlákna byla vytvořena ze skla s příměsí oxidu olovnatého a vykazovala útlum 7,7 dB/km. [12]. V roce 1991 bylo vytvořeno vlákno na základě křemičitého skla pro CO₂ lasery, jejich útlum dosahoval hodnot pod 1 dB/km. Jádro dutého vlákna bylo obvykle menší než 1 mm a index lomu byl příliš malý [12] [26].

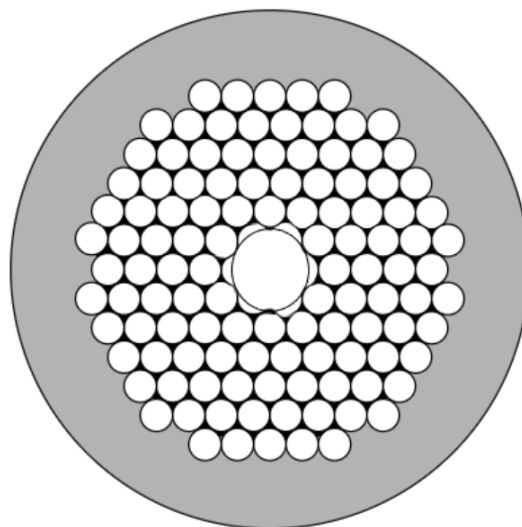
První experiment a výsledky fotonického vlákna sdílel J. C. Knight kolem roku 1996. Experiment byl založen na myšlenkách od P. St. Russella, který vycházel z dokumentu o existenci 1D a 2D krystalu. Fotonické vlákno bylo následně prezentováno v roce 1999 na univerzitě v Bath. Zasloužil se o to právě tým pod vedením P. St.

Russella. Jednalo se o vlákna na principu 2D krystalu s mechanismem zakázaného pásu (HC-PBGF). Vlákno se podobalo včelímu úlu a mělo průměr jádra $14,8 \mu m$, jeho průřez je znázorněn na obrázku 2.1. Vlákno se skládá z jedné větší vzduchové mezery uprostřed vlákna (jádro) a ta je obklopena dalšími menšími vzduchovými mezerami [12] [34].



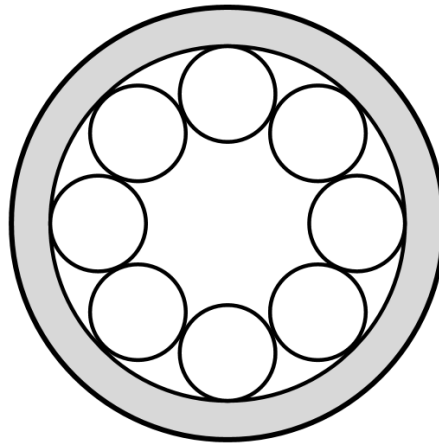
Obr. 2.1: Podoba prvního fotonického vlákna [34]

Vlákna stále procházela vývojem a cílem bylo neustále minimalizovat útlum v pásmu C (1550 nm). V roce 2002 vzniklo vlákno, kterému se říká podél anglického označení 7-cell PBGF. Číslice 7 nám říká kolik vzduchových mezer bylo vynecháno a tvoří tak větší jádro. Toto jádro se vyznačovalo útlumem 13 dB/km [12]. Jeho podoba je přibližně znázorněna na obrázku. Princip je v podstatě stále stejný. Jádro je větší vzduchová mezera uprostřed vlákna a je souměrně obklopeno menšími vzduchovými mezerami 2.2.



Obr. 2.2: 7-cell PBGF [34]

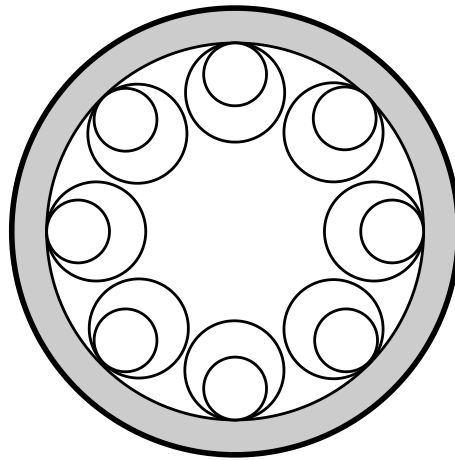
V roce 2004 se pak podařilo vytvořit vlákno vykazující útlum 1,7 dB/km. Rok na to se povedlo útlum snížit na hodnotu 1,2 dB/km. Konkrétně se to stalo u vlákna s označením 13-cell PBGF. Číslo nám opět udává počet vynechaných vzduchových mezer. Jádru u 13-cell PBGF je větší než u předchozího typu [12] [34]. Kromě fotonických vláken se ale zároveň vyvíjela vlákna, která pracovala na principu antirezonanance. První takové vlákno neslo název Kagome HCF. Struktura vlákna je podobná vláknům PBGF, ale rozteč struktury kolem jádra je větší. To umožňuje rozšířit optické přenosové pásmo. Také se změnila okolní struktura kolem jádra. Skládá se z trojúhelníků, které se vzájemně překrývají [34]. První takové vlákno bylo vytvořeno v roce 2002 a jeho útlum byl dost vysoký, uváděné hodnoty jsou až 2000 dB/km. V roce 2010 přišel nástupce s negativním zakřivením kolem jádra. To mělo vést ke snížení útlumu, ale stejně vlákno vykazoval podstatně vyšší útlum než vlákna se zakázaným pásem [12] [34]. Dalším objevem ze skupiny antirezonančních vláken jsou vlákna s jednodušším uspořádáním trubiček kolem jádra. Základní model tohoto typu vlákna připomínal zásobník revolveru, jeho náčrt je vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: První princip ARF vlákna [34]

První takové vlákno vykazovalo celkem vysoký měrný útlum. Postupem času tak vznikají vlákna, která vycházejí z tohoto základního modelu, liší se pouze tvarem nebo uspořádáním trubiček kolem jádra. Druhé takové jednoduché vlákno vykazovalo měrný útlum 7,2 dB/km na vlnové délce 750 nm. Dalším zajímavým typem je vlákno NANF (Nested Antiresonant Nodeless Fiber). Struktura opět vychází ze základního modelu s tím, že se do kruhů kolem jádra přidávají další menší kruhy, viz obrázek 2.4. Takové jádro bylo vyvinuto v roce 2020 a jeho útlum byl 0,28 dB/km. Tato hodnota se velmi přibližuje ke klasickým vláknům [12] [34]. Na webináři od Philipa Russella (2023) bylo vlákno prezentováno s útlumem 0,174 dB/km pro vlnovou délku 1550 nm a byl naměřen v roce 2022. Limit současných vláken s pevným

jádrem je něco kolem 0,15 dB/km na vlnové délce 1550 nm. Tento limit je dán právě Rayleighovým rozptylem [21]. Nejnovější oznámený útlum dutého vlákna z roku 2024 je méně jak 0,11 dB/km [43].



Obr. 2.4: Vlákno typu NANF [34]

2.2 Vlákno se zakázaným pásem (PBGF)

Vlákna, která fungují na principu fotonického krystalu, jsou označována zkratkou HC-PCF (Hollow Core-Photonic Crystal Fiber). Jde-li o vlákna využívající mechanismus zakázaného pásu, značí se pouze zkratkou PBGF (Photonic Band Gap Fiber). Označení PCF nutně neznamená, že jde pouze o vlákna s dutým jádrem. Mohou to být také vlákna s pevným jádrem, která využívají totálního vnitřního odrazu. Z tohoto důvodu je lepší vlákna označovat plnou zkratkou HCF-PB [21] [35].

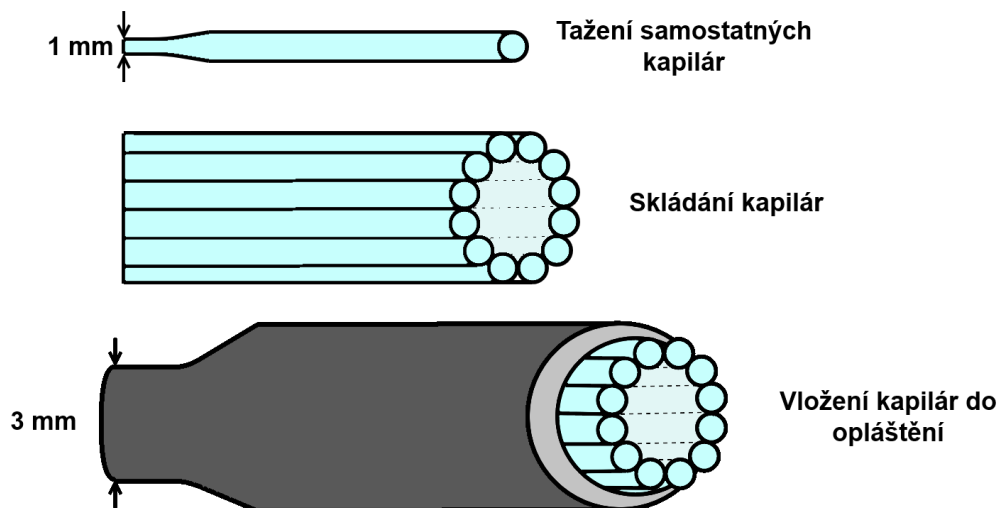
2.2.1 Princip zakázaného pásu

Na obrázku 2.2 je zobrazena jedna z možných podob vlákna se zakázaným pásem. Takové vlákno je tvořeno z kapilár, které na sebe přiléhají. Jádro následně vznikne počtem vynechaných kapilár. Od toho se potom odvíjí také název vlákna, například 7mi buňkové vlákno. Signál je veden skrze jádro uvnitř kapilár, právě díky mechanismu zakázaného pásu, který nedovolí následný únik signálu z jádra mimo plášť [12]. Signál se přenáší pomocí odrazu, kdy je index lomu jádra menší než index lomu obklopující plochy. Jednou z největších výhod PCF vláken je vysoká flexibilita. Pomocí různých úprav vlákna, jako je rozdílné uspořádání struktury vlákna a odlišný průměr jádra dokážeme vytvářet vlákna, která mají ve výsledku různé optické vlastnosti. Tyto vlastnosti nám dokážou pozměnit vliv vlákna v případě disperze nebo nelineárních jevů [25].

Podobně jako elektronický zakázaný pás, fotonický pás vymezuje dvě rozdílná prostředí. Ty nám zaručují, že se signál šíří uvnitř jádra. Aby bylo možné vést signál pomocí zakázaného pásu, je potřeba dodržet podmínku. Tato podmínka je splněna při dosažení kritického stavu mezi dvěma vlnovými prostředími. Kritický stav je závislý na struktuře vlákna. V praxi by to mohl být problém, protože potřebný celkový rozdíl dvou indexů lomu různých prostředí je poměrně vysoký. Pro vlákno s trojúhelníkovým rozložením je uváděn rozdíl indexu lomu $\Delta n > 2,2$. Tento vysoký rozdíl přináší omezení při výběru dielektrických prostředí. V roce 1990 Russell objevil možnost, jak nalézt takový poměr mezi vlnovými vektory, aby bylo možné vybírat libovolné dielektrikum. Princip byl ve volbě směru šíření v dostatečně malém úhlu vzhledem k rovině periodicity. A s postupem času se zlepšil technologický postup i výroba. Například první demonstrováné vlákno založené na mechanismu zakázaného pásu disponovalo rozdílem indexu $\Delta n = 0,44$, mezi sklem a vzduchem. První studie, které se zaměřují na tento typ vlákna, zkoumají, jaké je nejlepší uspořádání mřížek a defekt jádra pro vytvoření systému dutého jádra. Závěrem těchto studií bylo, že by trojúhelníková mřížka poskytovala silnější vedení vzduchu než mřížka ve tvaru včelího úlu, nicméně metody neumožňovaly studii vadných režimů uvnitř vlákna. Nejnovější studie kombinují doposud známé metody a bylo již možné také studovat realistické struktury vláken se zásadními vadami. Poslední metody pro popsání PBG vycházejí z optických vláken [27].

2.2.2 Výrobní proces

První výrobní proces vláken se zakázaným pásem je datován k roku 1974. Metoda byla založená na protlačování materiálu kapilár skrze sítko. Tato metoda se ukázala jako obtížná, hlavně vůči tvrdému materiálu. Podobně jako u ARF vlákno se nyní využívá metoda složení preformy a následně tažení. Nejprve se z tyček tahají samotné kapiláry o průměru přibližně 1 mm, které se postupně skládají do tvaru odpovídajícího krystalického dutého vlákna. Skládaná část z kapilár se vsune do skleněné trubice, ze které je následně vlákno taženo. Stejně jako u vlákna ARF je zde při tažení vlákna zaveden plyn, který má za úkol zachovat strukturu vlákna a zamezit tření. Plyn je vtlačěn při procesu tažení do třech míst. Jednou z nich je asistence plynu v oblasti jádra, další jsou asistence plynu v oblasti opláštění a vnějšího pláště. Technika byla poprvé využita u Kagome a postupně se stala obecnou pro výrobu PCF vláken. Díky tomuto výrobnímu procesu lze vyrábět mřížky z desítek nanometrů a potlačit ztráty. Následný proces tažení vychází opět z výroby klasických vláken [30].



Obr. 2.5: Výroba PCF vlákna [30]

Obrázek pouze ilustruje kompletní preformu vlákna typu PCF. Jednotlivé kapiláry tažené do průměru 1mm jsou v druhém kroku skládány, dokud nevznikne jádro. V plášti dochází nejprve k tažení do průměru 3 mm a potom k tažení až na průměr $300 \mu\text{m}$ [30].

2.3 Antirezonanční duté vlákno (ARF)

Základní struktura vlákna, ze kterého vycházejí ostatní modifikace tohoto typu vlákna, byla nastíněna v kapitole 2.1. Klasické vlákno vychází z principu totálního odrazu, princip antirezonančního vlákna bude vysvětlen pomocí modelu ARROW. Princip ARROW je založen na koherentních odrazech dvou prostředí, které usměřují světlo do středu jádra. Oblast jádra se chová jako rezonanční dutina Fabry–Perot, protože je oblast tvořena nízkými (vzduch) a vysokými (např. sklo) refrakčními indexovými vrstvami. [12] [22] [23].

2.3.1 Princip antirezonančního vlákna

Základní princip rezonance bude vysvětlen na jednodimenzionálním planárním vlnovodu. Na ilustračním obrázku 2.6 je vidět průřez planárního světlovodu s podmínkou $D_{\text{jádro}} \gg \lambda$, kde $D_{\text{jádro}}$ značí šířku desky (průměr jádra) mezi dvěma stejnými materiály ze skla. Písmeno t značí tloušťku daného materiálu, n_0 (vzduch) a n_1 (sklo) jsou indexy lomu daného materiálu. Pro vlnový vektor k_T platí fázový rozdíl $2m\pi$, m je konstanta nabývající celých kladných čísel $m = 1, 2, 3, \dots$. Rovnice je dána vztahem [12]:

$$k_T t = \pi \cdot m, \quad (2.1)$$

vektor k_T může být aproximován pomocí $n_0 k_0$, dostaneme nový vztah pro vektor k_T v oblasti skla [24]:

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

kde n_0 značí opět index lomu vzduchu a n_1 značí index lomu skla. Parametr $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ označuje vlnový vektor ve vzduchu [24]. Jelikož je index lomu vzduchu $n_0 = 1$, můžeme vztah upravit následovně [12]:

$$k_T = k_0 \cdot \sqrt{n_1^2 - 1} \quad (2.3)$$

Nyní máme všechny potřebné poznatky a můžeme vyjádřit rovnici pro určení tloušťky skleněné vrstvy, z které můžeme také vyjádřit rezonanční vlnovou délku. Tloušťku t vyjádříme zkombinováním dvou rovnic 2.1 a 2.2 a také pomocí předpokladu: $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$. Po úpravách dostaneme [24]:

$$t = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot \sqrt{(n_1^2 - 1)}} \quad (2.4)$$

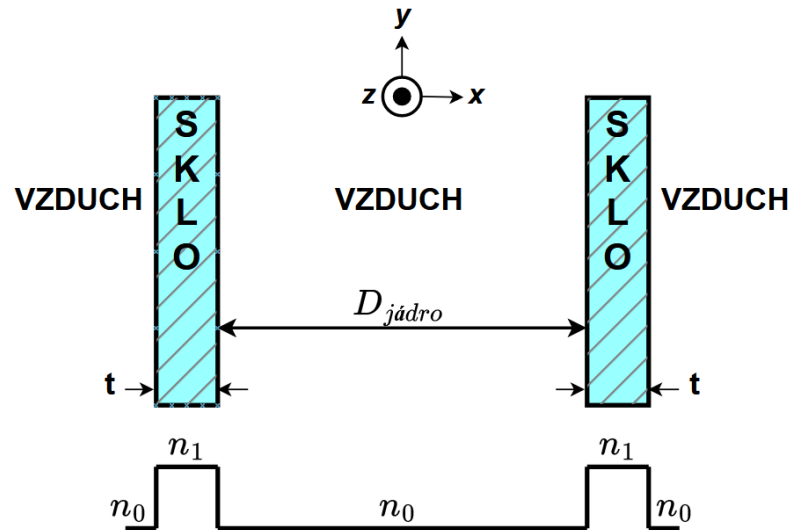
Vztah pro případ rezonance už máme, teď stačí vyjádřit vztah pro antirezonanční podmínku. Vztah je velmi podobný, pouze se od koeficientu m odečte hodnota 0,5. Tím dostáváme následující vztah [24]:

$$t = \frac{(m - 0,5) \cdot \lambda}{2 \cdot \sqrt{(n_1^2 - 1)}} \quad (2.5)$$

Ze vztahu 2.4 pro tloušťku vyjádříme λ a dostaneme výsledný vztah pro rezonanční vlnovou délku λ_{rez} [24] [12]:

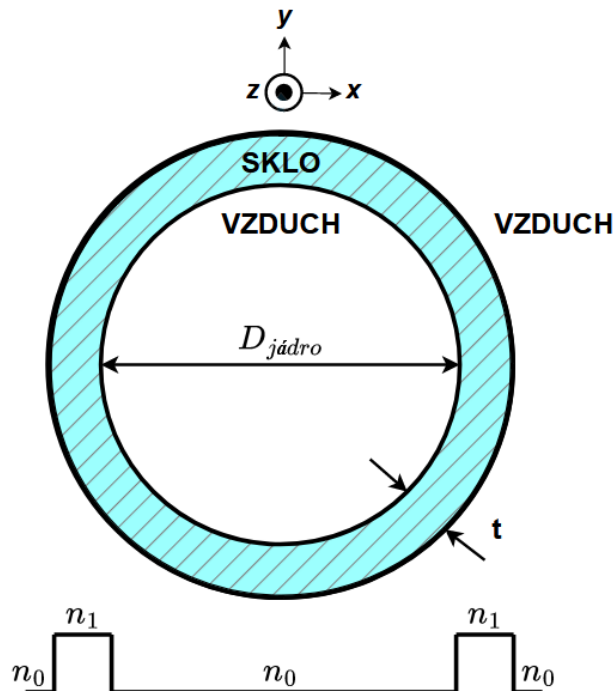
$$\lambda_{rez} = \frac{2 \cdot t \cdot (\sqrt{(n_1^2 - 1)})}{m} \quad (2.6)$$

V případě vlnových délek, které jsou rozdílné vůči λ_{rez} , dochází k vedení signálu s minimem ztrát v jádře. V případě, že je vlnová délka zdroje rovna té rezonanční dochází k šíření v příčném směru a k velkým ztrátám[12].



Obr. 2.6: Struktura 1D vlnovodu [24]

Nyní se podíváme, jak funguje výše uvedený postup u klasického, tedy kulatého vlákna. Princip je zde velmi podobný, průřez takového vlákna je zobrazen na obrázku níže 2.7.



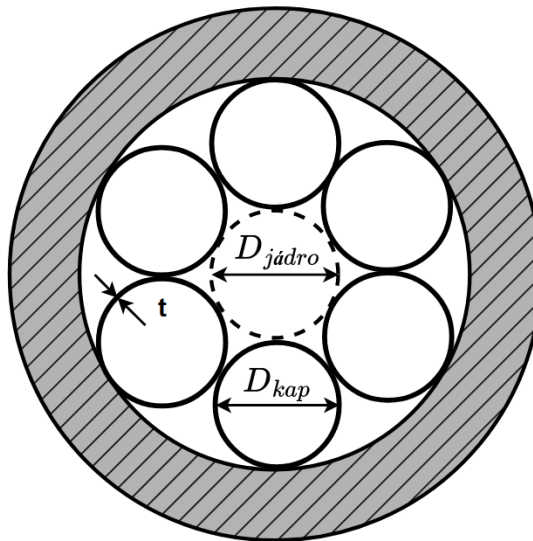
Obr. 2.7: Struktura kulatého vlnovodu [24]

Šíření vidů probíhá uvnitř přímo ve středu jádra. Vidy mají tedy efektivní index, který je menší než oba indexy lomu, tedy n_0 a n_1 . Velikost ztrát závisí na šířce jádra

a také na tloušťce skla. Vidy, které se šíří právě v plášti, v našem případě oblasti vzduchu, mají efektivní index mezi hodnotou n_0 a n_1 [12] [24]. Z výše uvedených poznatků a rovnic je vidět, že přenosová vlnová délka, a tedy pozice přenosového okna závisí spíše na tloušťce kapilár než na rozměrech jádra. Nicméně průměr kapilár i také průměr jádra mohou ovlivnit přenos jednoho vidu a také ohybové ztráty [22].

2.3.2 Antirezonančního vlákna s negativním zakřivením

Vlákno je označováno jako negativní, protože jeho ohraničení je zakřiveno v jiném směru než jádro [21]. Klasické vlákno bez negativního zakřivení je uvedeno na obrázku 2.7 Jinými slovy vlákno s negativním zakřivením má ve své struktuře vloženo několik kapilár, které tvoří kruhový tvar pláště. Průřez takového vlákna je zobrazen na obrázku 2.8. Základní model tzv. typu revolver byl popsán v kapitole 2.1. Také bylo již zmíněno, že existuje několik druhů a ty se liší právě umístěním trubiček. Trubičky se mohou vzájemně dotýkat, anebo jsou odděleny mezerou. Jiným typem je vlákno s vnořenou dutinkou. Jedním z důležitých parametrů, které vidíme na obrázku 2.7, je tloušťka kapilár t a průměr jádra $D_{\text{jádro}}$. Modrá zóna označuje skleněný materiál kolem vzduchového jádra[24].



Obr. 2.8: Struktura vlákna s negativním zakřivením [24]

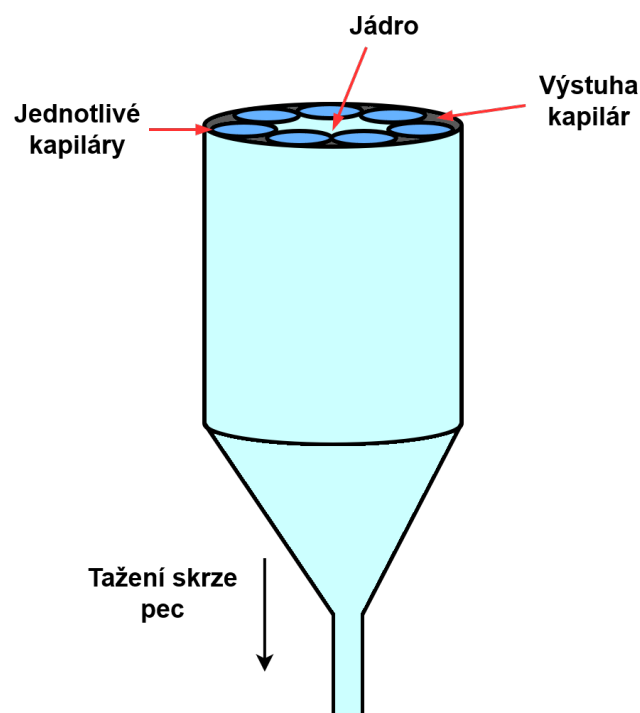
Pomocí následující rovnice dostaneme výpočet pro průměr jádra [24].

$$D_{\text{jádro}} = \frac{(d_{\text{kap}} + 2 \cdot t)}{\sin(\frac{\pi}{p})} - (d_{\text{kap}} + 2 \cdot t), \quad (2.7)$$

kde máme novou neznámou, a to je index p , ten nám značí počet kapilár. Ostatní proměnné jsou zmíněné na začátku této kapitoly. Návrh tohoto typu vlákna je podstatný, protože má veliký vliv na jeho přenosové vlastnosti. Oproti klasickým kulatým ARF vláknům vykazuje vlákno s negativním zakřivením menší ztráty. Ty jsou ovlivněny i změnou jádra, konkrétně ztráty klesají se zvětšujícím se jádrem. [12] [24].

2.3.3 Výrobní proces ARF

Výrobní proces ARF vlákna je velmi podobný procesu, který byl zmíněn v kapitole 1.4.2. Největší rozdíl je u vytváření dané preformy. Prvním krokem je vytvarování kapilár ze skleněných tyček. Kapiláry se následně vloží do širší duté skleněné tyčky a zapřou se podpůrnou tyčkou proti zamezení jejich pohybu. Celá preforma se dá zapéct do vakuové pece na teplotu 210 °C, aby se kapiláry spojily s pláštěm. V průběhu výroby jsou do vlákna zavedeny plynové trubice, které pomáhají kontrolovat geometrii a zároveň zmenšit tření. Plyn je aplikován pro jádro a také v prostoru pláště (kapilár). Na obrázku 2.6 je ilustrována možná podoba preformy pro ARF vlákno. Tímto procesem je preforma připravená k tažení skrze pec, teplota pece může dosahovat hodnot až kolem 2000 °C. Následně se měří průměr vlákna a dochází k nánosu pláště [28] [29].



Obr. 2.9: ARF tažení preformy [29]

2.4 Aplikace dutého vlákna a jeho porovnání s klasickým vláknem

Aplikace dutého vlákna

Uplatnění dutého vlákna lze nalézt v telekomunikacích, ale také v sensorice. Díky nižší odezvě mohou vlákna najít uplatnění v přenosech, kde je velmi vysoký nárok na časové zpoždění. Také mohou být využita v spektrálních regionech, kde jsou klasická vlákna právě limitována. Plynně plněná dutá vlákna mohou být využita při výrobě laserů. Z pohledu vysokého výkonu jsou lasery využívány v mikrooperacování. Při tomto procesu je potřeba vysokého výkonu a klasická vlákna jsou s rostoucím výkonem náchylnější na nelineární jevy. Dále lze dutá vlákna využít také v nemocničním prostředí nebo pro výrobu optických součástí, jako třeba filtrů, děličů atd. Vysoké zastoupení dutého vlákna lze nalézt také v interferometrii a sensorice [12] [21] [24] [26].

Porovnání dutého a klasického vlákna

Výše byly zmíněny asi nejdůležitější výhody dutého vlákna, díky kterým může konkurovat klasickým vláknům – současná vlákna narážejí na limity, kvůli kterým je obtížné snížit útlum. Měrný útlum klasického jednovidového vlákna byl v roce 2018 kolem 0,14 dB/km pro vlnovou délku 1550 nm. Duté vlákno NANF v roce 2022 dosahovalo hodnot útlumu 0,174 dB/km. Při pohledu do historie se útlum dutého vlákna každou chvíli mění a začíná se přibližovat útlumu, který vykazují klasická vlákna. Největší výhodou dutých vláken však jsou nízké ztráty při přenosu na větší vzdálenosti, a to bez použití zesilovačů. Dokáží přenášet vysoký výkon a zároveň jsou odolná vůči nelineárním jevům. Klasická vlákna jsou s příchodem zvyšování vysílacího výkonu limitována právě nelineárními jevy. Existují různé typy vláken, které jevy umí minimalizovat, nicméně nikoliv plně eliminovat. Dutá vlákna zároveň nejsou limitována oblastí, kde klasická vlákna ano, a to Rayleighovým rozptylem. Asi největší nevýhodou dutého vlákna je naopak pořizovací cena, která je příliš vysoká. Na stránkách Thorlabs se cena pohybuje dle typu vlákna od 400 do 700 dolarů za metr. Za takových cenových podmínek nepřichází v úvahu plná náhrada jednovidového vlákna za duté vlákno, proto je potřeba vyřešit propojení těchto dvou atypických vláken. Vývoj klasických vláken přitom není úplně pozastaven, stále jsou možnosti, jak zvyšovat přenosovou kapacitu například za použití více jader v jednom vlákně [12] [17] [21].

3 Spojování optických vláken

Optická vlákna se vyrábí s omezenou délkou, proto je nutné vlákna na delších trasách propojit. Zároveň je potřeba v případě spojení zachovat minimální ztráty na přenosové cestě – optické spoje dělíme na trvalé a rozebíratelné [37].

Trvalé spoje

U těchto spojů se nepočítá s rozebíráním. Trvalé spoje se nejčastěji realizují pomocí sváření. Na trvalý spoj můžeme narazit v rozvaděči, kam je zaveden přívodní kabel, který následně navařen na metrový kabel s koncovkou, tzv. pigtail. U sváření se nejvíce klade důraz na přípravu vlákna před samostatným svárem. V dnešní době existují plně automatizované svářečky, které nemají problém svařit klasická vlákna. V případě správného postupu vykazuje svár útlum pod 0,1 dB [37].

Rozebíratelný spoj

Je obvykle realizováno pomocí optických konektorů a využívá se v místech, kde dochází k častějšímu přepojování. Konektorů je spousta a hlavní rozdíl je v jejich parametrech. V případě optických konektorů rozlišujeme přenosové parametry jako vložný útlum a útlum odrazu. Hodnota útlumu konektorů bývá menší nebo rovna 0,5 dB. V případě optických konektorů je také potřeba dbát na čistotu [37].

3.1 Sváření optického vlákna

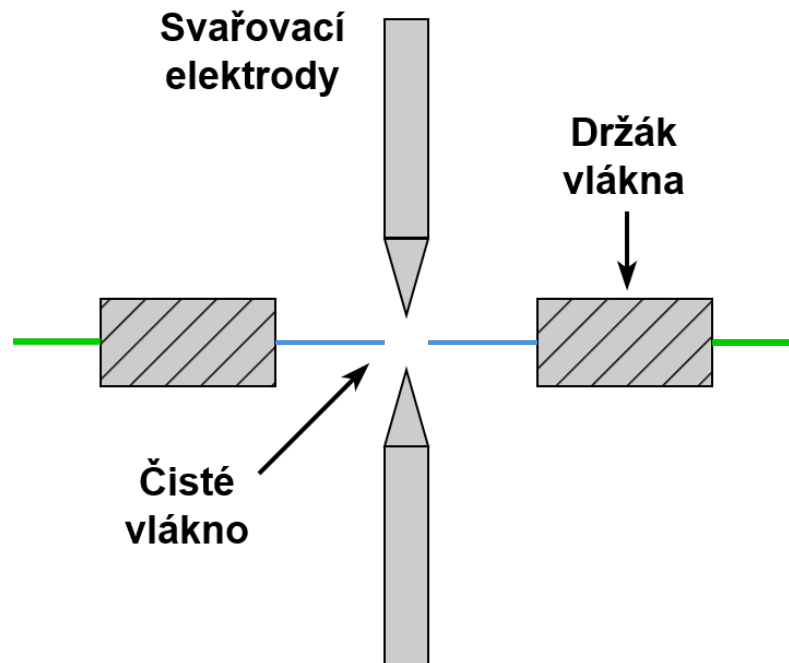
Příprava vlákna před svárem

Nejprve je nutné odstranit z vlákna primární ochranu, toho docílíme použitím tzv. stripovacích kleští. Po odstranění primární ochrany se musí vlákno zalomit pomocí lamačky. V lamačce nastavíme vlákno na požadovanou velikost a zachytíme pomocí pouzdra, které brání vláknu v pohybu. Každá nečistota, včetně dotyku prstů, může hrát roli v kvalitě sváru, proto je vhodné zalomené vlákno očistit. Při zalomení je důležitá kolmost lomu, její odchylka by měla být maximálně 1 stupeň [2].

Proces sváření vlákna

Oba konce vlákna připravené na sváření připneme do svářecího ústrojí. Vlákna je potřeba umístit proti sobě v ose, případně je srovná automatická svářečka. Po nastavení dojde ke sváru pomocí oblouku mezi elektrodami. Ideální výsledný svár pak

vykazuje útlum nižší jak 0,1 dB. Výsledný útlum je rovnou vypočten svářecím autotomatem. Konečný svár je potřeba ochránit pomocí plastové trubičky, která se přes něj přetáhne a nechá zatavit [2].



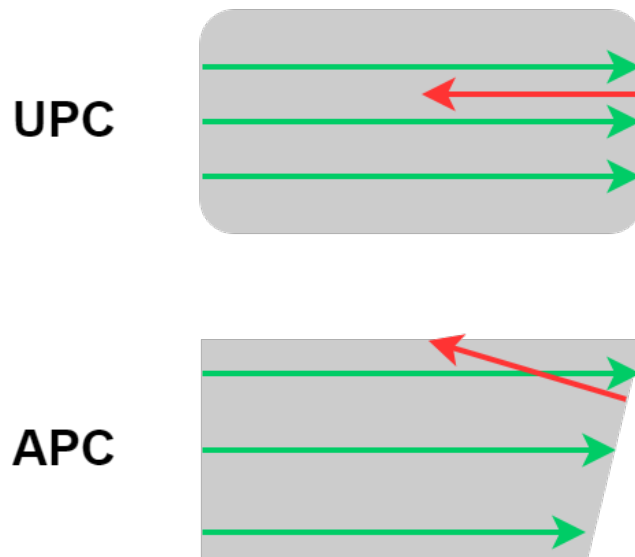
Obr. 3.1: Princip sváření elektrickým obloukem [2]

3.2 Optické konektory

Optických konektorů je mnoho typů, avšak nejprve je vhodné uvést samotné zakončení konektoru, kterému se říká Ferrule. Rozeznáváme hned tři[31]:

- PC (Physical Contact) konektor
- UPC (Ultra Physical Contact) konektor
- APC (Angled Physical Contact) konektor

Konektor typu **PC** je běžný typ konektoru využíváný u vícevidových vláken OM1 a OM2 a je mírně zaoblený. Dokáže eliminovat vzduchovou mezeru dvou různých prostředí. U jednovidového režimu je zpětná ztráta udávána kolem -40 dB. Tento typ konektoru je spíše zastaralý, lepší parametry nabízí konektor typu **UPC**, který je více finálně obroušen a nabízí tak hodnoty zpětného rozptylu až přes -50 dB. Jeho nevýhodou je neustálé přepojování konektoru, které opotřebovává povrch a přináší tak ztráty v přenosu. Poslední zmíněná úprava je **APC**, ta nabízí hodnoty zpětného rozptylu až přes -60 dB. Konektor je leštěn pod úhlem 8 stupňů. A jejich charakteristika je, že odráží zpětné světlo pod úhlem do pláště. Pro tento druh konektoru je vhodné propojení s úhlovým konektorem, jinak mohou vznikat ztráty[31] [32].



Obr. 3.2: UPC a APC konektor [32]

Mezi nejznámější konektory řadíme následující: [33]:

- **FC (Ferrule connector)** – První konektor využívající keramickou koncovku (ferulle), je také zajištěn pomocí šroubovacího závitu. Konektor vykazuje vložený útlum 0,2 dB a odrazivost 50–65 dB, záleží na úpravě ferully. Obvykle se používá v telekomunikacích [2] [33].
- **SC (Subscriber connector)** – Konektor, který spadá pod standard TIA–568. Je to hranatý konektor, který se uchycuje pouhým vsunutím. Dokáže kontrolovat polarizace a využívá se v telekomunikacích, včetně pasivních optických sítí. Průměr ferully je 2,5 mm, vložený útlum 0,2 dB a odrazivost v rozmezí 50–65 dB [2] [33].
- **LC (Lucent connectro)** – Je malý konektor o velikosti ferulle 1,25 mm. Jeho velikost je vhodná pro využití v aplikacích s hustým provozem. V současnosti asi nejpoužívanější konektor [2] [33].
- **ST (Straight connector)** – Přímý konektor vytvořen a licencován firmou AT&T. Velikost ferully je 2,5 mm a konektor je typu bajonet. Pro správné zastrčení do soketu je potřeba konektor uzamknout otočením. Využívá se na krátké i dlouhé vzdálenosti. Hodnota útlumu je 0,4 dB a odrazivost je 50 dB [2] [33].
- **E2000 (Euro 2000)** – Konektor je po zastrčení automaticky uzamčen závěrkou, která slouží jako ochrana proti prachu a laserovému záření. Využívá se v aplikacích s vysokým výkonem. Hodnota útlumu se pohybuje kolem 0,2 dB [2] [33].

3.3 PCF vlákno a svařovací procesy

V posledních letech dochází ke zlepšení přenosových vlastností vláken s dutým jádrem, a je tedy potřeba vyřešit problém s napojením na klasická vlákna. Proto se v této kapitole zaměříme na problémy spojené se svařováním dutých vláken typu PCF s klasickým vláknem. Cílem je realizovat hybridní spoj s co nejnižším útlumem. Nejčastějším problémem při sváření PCF vlákna je kolaps mikrostruktury a také rozdílný parametr MFD. Podmínkou pro realizaci spojů jsou například stejný parametr MFD pro obě vlákna, zúžení vlákna, zalomení vlákna pod úhlem a také využití svařecího automatu, který umožňuje široké možnosti nastavení [38].

Kolaps vzduchových mezer

V případě většího nahřátí PCF vlákna při sváření může docházet ke kolapsu mikrostruktury vlákna. PCF vlákna mají menší bod tání než klasická vlákna, proto k tomuto problému může docházet. Kolaps mikrostruktury je dán rovnicí [38]:

$$V_{kolaps} = \frac{\gamma}{2\eta} \quad (3.1)$$

Písmenko γ značí povrchové tření a η značí viskozitu. Zničení mikrostruktury vlákna znamená zvýšené ztráty způsobené svářením [38].

Odlíšné parametry MFD (Mode Filed Diameter)

Tento parametr nám udává prostorové rozložení intenzity uvnitř vlákna. Je to oblast ve vlákně, kde je největší koncentrace optického výkonu. Tyto ztráty mohou být vyjádřeny pomocí následující rovnice [38]:

$$\alpha = -20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \omega_{PCF} \cdot \omega_{SMF}}{\omega_{PCF}^2 + \omega_{SMF}^2}\right) \quad (3.2)$$

ω_{HCF} je parametr pro vlákna s dutým jádrem a ω_{SMF} parametr pro klasická vlákna. Teoretické výpočty byly následně ověřeny a svár u vláken se stejným parametrem MFD vykazoval nižší ztráty. Také bylo ověřeno, že rozdílný parametr MFD dokáže způsobit rozsáhlé ztráty způsobené svárem [38].

Princip sváření mezi PCF a SMF vláknem

Pro minimalizaci ztrát způsobených kolapsem mikrostruktury je dobré volit nižší výkon výboje a také kratší čas. Při snižování výkonu je nutné dát pozor na pevnost sváru, která může být ovlivněna. Další nastavitelný parametr je délka překryvu vláken při svařovacím procesu. Jinou možností je posunutí oblouku výboje od PCF vlákna, to může opět zamezit kolapsu mikrostruktury a zároveň docílit vyšších teplot při sváření na straně SMF vlákna [38].

3.3.1 Změna polohy obloukového výboje

Tato metoda upravuje svařovací proces a nastavuje obloukový výboj. Proces se skládá pouze z výboje předehřevu, který byl snížen, aby nedocházelo ke kolapsu mikrostruktury. Hlavní výboj byl nastaven na pevnou hodnotu a mění se pouze výkon výboje. Dále byla nastavena změna polohy výboje a překryv při sváření, ostatní parametry zůstaly nastavené automaticky z profilu pro SMF vlákna [38].

3.4 ARF vlákno a svařovací procesy

I zde je nutné dát pozor na zhroucení struktury vlákna, neboť mají vysoký podíl vzduchu (obvykle 50 %). U ARF vlákna jsou postupy víceméně stejné a spočívají v různém nastavování svářecího automatu. Z tohoto důvodu budou uvedeny pouze metody založené na konkrétních experimentech [39].

3.4.1 Nastavení a změna polohy obloukového výboje

Princip této metody je založen na nastavení různých parametrů svářecího automatu, přičemž základní nastavení vychází opět z profilu pro klasická SMF vlákna. Došlo tu ale k přenastavení výkonu předehřevu a také hlavního výboje a jejich časů. Oblouk výboje byl opět posunut směrem k SMF vláknu od středu spoje. Nevýhodou metody sice je poničení struktury ARF vlákna a také možné snížení pevnosti sváru. V konkrétním experimentu však vlákno splnilo podmínky pevnosti spoje po sváření [39].

3.4.2 Princip založený na úhlu zalomení vlákna

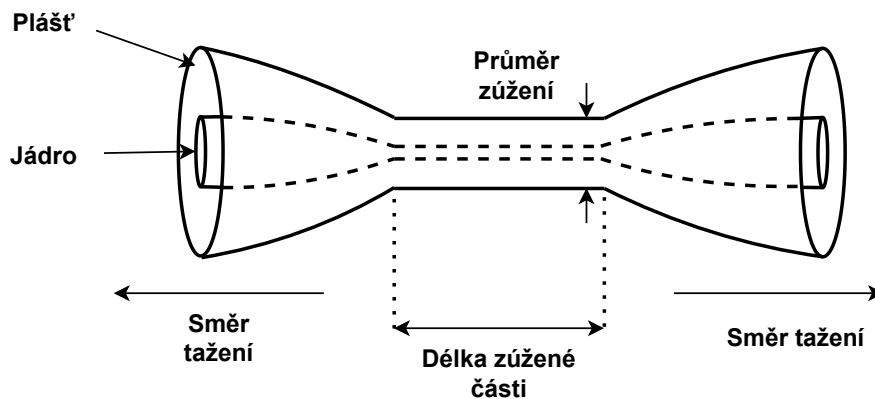
Tato metoda je založená na zalomení vlákna pod úhlem. Kromě vlákna ARF a SMF je využito také vlákno s gradientním indexem lomu (GRIN), které slouží jako propoj mezi SMF a ARF vláknem. Klasické SMF vlákno bylo tedy svařeno s vláknem, které má gradientní index lomu, a dále s dutým ARF vláknem. Vlákna s gradientním indexem lomu byla zalomená pod určitým úhlem, který vykazoval zpětný rozptyl kolem -40 dB. O této metodě a případně její optimalizaci můžeme nalézt více v dané literatuře [40].



Obr. 3.3: ARF napojené na SMF skrze GRIN [40]

3.4.3 Princip založený zúžení optického vlákna

Tato metoda spojení je realizována pomocí zúženého (Tapered Fiber) vlákna. Od takového spoje očekáváme nižší ztráty, které mohou být způsobeny svárem dvou rozdílných vláken. Princip zúžení vlákna je velmi jednoduchý, jde o zahřátí vlákna v místě zúžení a následné natažení vlákna z obou stran. Při této metodě dochází také ke zúžení jádra v poměru 1:1 s pláštěm. Tzn., že při zúžení vlákna o 50 % dochází také k zúžení jádra o 50 % z původní velikosti. Zúžení vlákna lze provést různými způsoby, v našem případě byla využita funkcionality, kterou nabízí svářecí automat Fujikura FSM-100P [41] [42].



Obr. 3.4: Zúžení vlákna [42]

4 Vyhodnocení útlumu optického vlákna

Měření útlumu optického vlákna je prováděno různými způsoby. V naší práci bylo využito metody OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), která vyhodnocuje útlum na základě zpětného rozptylu. Před kontrolou útlumu je vhodné konektory prověřit kamerkou, případně rovnou očistit. Očištění se obvykle provádí pomocí čistícího pera, případně lihem.

4.1 Kontrola konektoru

V našem případě byla využita kamera, která dokáže odhalit veškeré nečistoty, případně poškození konektoru. V praktické části jsou porovnány dvě fotografie, které ukazují silně znečištěný a čistý konektor. Sondu je možné připojit k počítači nebo rovnou k měřicímu přístroji. Je schopná prosvítit konektor, resp. ferully a odhalit její nedostatky. Záření sondy prochází filtrem, aby nedošlo k poškození zraku [2].

4.2 Metody pro měření útlumu

Útlum na trase vlákna je dán kvalitou spojek, svárem, kvalitou vlákna a také roste s délkou trasy. V reálném prostředí se vyhodnocuje tzv. měrný útlum, který udává jednotku dB na jednotku km (dB/km) [2] [36].

$$\alpha(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{l}, \quad (4.1)$$

kde α značí měrný útlum, u je útlum a l je délka. Samotné měření útlumu je nejčastěji prováděno pomocí následujících metod [36]:

- Metoda dvou délek
- Metoda vložených ztrát
- Metoda OTDR

4.2.1 Metoda dvou délek

Tato metoda je také nazývána jako referenční a považována za nejpřesnější. Její nevýhoda je krácení vlákna (zhruba o 2 metry) při každém měření, a není tedy vhodná při měření pevných tras, ale spíše někde v laboratořích. Metoda se skládá ze dvou kroků. Nejprve se proměří útlum na celé délce trasy. V druhém kroku se vlákno u zdroje zkrátí o 2 metry a změří na zkráceném konci. Výsledný útlum vychází z rovnice [2] [36]:

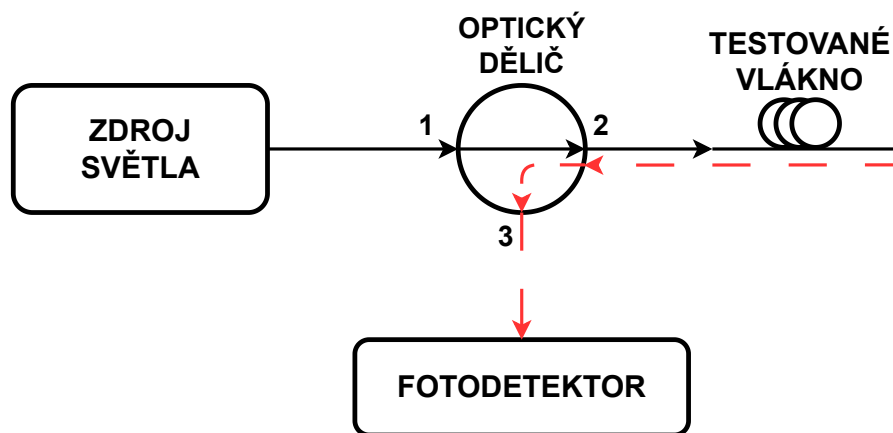
$$u(\lambda) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (4.2)$$

4.2.2 Metoda vložných ztrát

Skládá se ze dvou kordů, stejně jako metoda dvou délek. V tomto případě nejdříve změříme výkon (P_2) vlákna, které je zhruba dva metry dlouhé a po změření napojíme vlákno pomocí konektoru na trasu a opět proměříme celou trasu. Dosazením do rovnice 4.2 získáme opět výsledný útlum [2] [36].

4.2.3 Metoda OTDR

Obě zmíněné metody výše spadají do kategorie přímých metod. Nevýhodou těchto metod je potřeba zapojení vlákna do přístroje na druhém konci. Následující metoda OTDR je založená na principu zpětného rozptylu, a není tak potřeba připojovat druhý konec měřené trasy. Metoda využívá zpětného Rayleighova rozptylu a také Fresnelova odrazu na konci vlákna. Pomocí výsledného grafu z metody dokážeme zjistit určité informace na trase, jako je třeba svár a zalomení – na obrázku níže je vyobrazeno zjednodušené schéma OTDR. Od zdroje světla se šíří pulsy do optického děliče (coupler) až na konec trasy. Následně se Rayleighův zpětný rozptyl (červená přerušovaná šipka) vrací směrem ke zdroji, kde díky optickému děliči dojde ke změně směru (vývod 3). Po děliči je snímáný zpětný rozptyl pomocí fotodetektoru vyhodnocen a dále zobrazen ve formě grafu na obrazovku [2] [36].



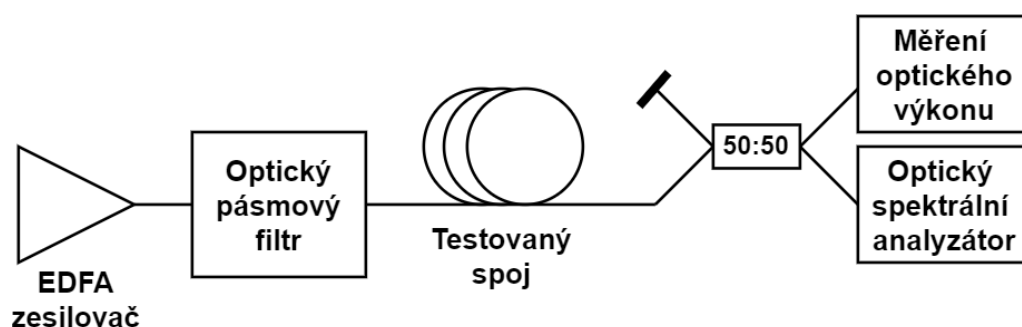
Obr. 4.1: Schéma OTDR [2]

4.2.4 Alternativní metoda měření pro spoj SMF–HCF

Klasické měřicí metody nejsou vhodné pro měření našeho spoje SMF–HCF, což se nám také v praktické části ověřilo. V práci byla využita metoda zpětného rozptylu a také přímá metoda. Obě nám po změření trasy vykazaly útlum, který byl skoro 2x menší než při měření alternativní metodou. V článku [44] byla navržena alternativní metoda, která se skládá z následujících komponent [44]:

- Optický zesilovač EDFA.
- Optický filtr pro vlnovou délku $1550 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$.
- Měřený spoj
- Dělič optického výkonu 50:50
- Optický spektrální analyzátor
- Přístroj pro měření optického výkonu

V jiných měření bylo podobné zapojení provedeno také s optickým cirkulátorem, který zpětný signál vracel na optický analyzátor. Varianta s cirkulátorem by se mohla přirovnat k metodě OTDR na obrázku 4.1. Před vstupem do cirkulátoru byl umístěn filtr, na výstup cirkulátoru pod číslem 2 byl umístěn přístroj pro měření optického výkonu a na výstup 3 byl připojen optický analyzátor [44].



Obr. 4.2: Alternativní metoda měření [44]

Jako referenční spoj je zde uváděn svár dvou zakončovacích jednovlákových vláken. Po odečtení referenční hodnoty z přístroje je následně vkládán svár typu SMF–HCF mezi zakončovací vlákna, spoj je postupně upravován a měřen. Výsledné hodnoty jsou vyčítány z měřiče optického výkonu, pro hodnotu na jednom sváru je uvažována pouze polovina hodnoty z přístroje [44].

Veškeré svářecí a měřicí metody lze nalézt také ve sborníku [45]. Také je zde uvedeno jak postupovat při sváření SMF–HCF, aby svár vykazoval minimální ztráty způsobené rozdílným parametrem MFD [45].

5 Svařování optického vlákna

V diplomové práci byl použit svářecí automat na optická vlákna FSM–100P. Pro samostatné sváření HCF vláken bylo potřeba pochopit, jak takový automat vůbec funguje. Z toho důvodu bylo sváření prováděno nejprve na klasickém vlákně, konkrétně svářením jednovidového vlákna s mnohavidovým. Před vlastním svářením je však nutné dodržovat nějaké postupy, které minimalizují ztráty způsobené svářením na minimum. Například je třeba očistit vlákna po stažení primární ochrany a také lámat konce vlákna pod minimálním úhlem. Dbát na čistotu bylo zásadní i v případě finálního měření útlumu přímou metodou a metodou OTDR, proto bylo provedeno ošetření konektorů sondou a také čistícím perem.

5.1 Popis svářecího automatu Fujikura FSM–100P

- 1 – Dva displeje, které slouží pro nastavení svářčky a také ukazují proces při sváření v reálném čase.
- 2 – Sekce tlačítek, kterými se dá svářčka ovládat. Mimo to lze celý systém řídit skrze počítač pomocí USB kabelu a konkrétních programů.
- 3 – Tato část slouží pro zapečení ochrany pro provedený svár.
- 4 – Zde dochází k uchycení vlákna, aby se zamezilo samovolnému pohybu.
- 5 – Magnetický držák vlákna, různé velikosti podle průměru vlákna.
- 6 – Elektrody, kde dochází k výboji při sváření.
- 7 – Svorky pro zafixování vlákna.
- 8 – V-drážky, ve kterých je vloženo vlákno po stažení ochrany.
- 9 – Čočky, které zachycují proces sváření a přenáší ho na obrazovku.



Obr. 5.1: Svářecí automat Fujikura FSM-100P

5.2 Příprava před svářením

Před svárem je nejprve nutné připravit vlákno daného typu pro sváření. V případě sváření SMF s MMF bylo provedeno sundání primární ochrany pomocí kleští, které jsou k tomu přímo určené. K zalomení byla použita jednoduchá lámačka, která umí pouze nastavování délky oholení daného vlákna. Později byla využita automatická lámačka od firmy Fujikura CT-101/CT-102, která by měla být schopna lámat vlákno pod nastaveným úhlem. Dále bylo vlákno očištěno kapesníkem a isopropylalkoholem. Po očištění bylo na displeji automatu zřetelně vidět, jak je vlákno lehce znečištěné, asi prachem z kapesníku. Svářecí automat pro úplnou čistotu vlákna využívá výboj, který dokáže takové nečistoty plně odstranit.

5.3 Proces svařování

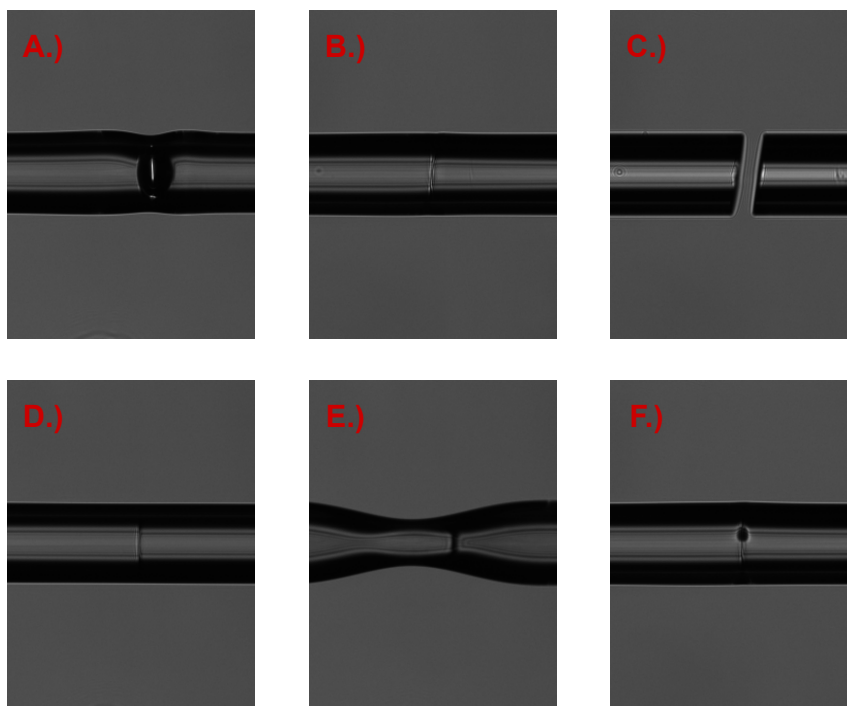
Pro různé druhy sváru byly vytvořeny odlišné svářecí profily. Pro první případ byl zvolen profil, který byl určen pro sváření SMF vláken. Následně však byl proces upravován a optimalizován pro minimalizaci ztrát, které mohou při sváření vznikat.

Při optimalizaci svářecího profilu bylo upraveno hned několik hodnot, které mohly mít zásadní vliv na kvalitu a velikost útlumu sváru. V první fázi byly prozkoumány hlavní parametry svářecího profilu:

- Main Arc Power – Upravuje výkon hlavního výboje
- Main Arc Time – Nastavuje délku trvání hlavního výboje

Postupně byly hodnoty měněny a byl zkoumán vliv na svár a také vliv na útlum. V tomto případě bylo objeveno několik krajních hodnot, při kterých byl vyhodnocen svár jako nekvalitní. Při velké hodnotě výboje se vlákna nespojila, naopak nedostatečná velikost hlavního výboje způsobila horší pevnost sváru. Stačilo malé zatáhnutí po provedení sváru a vlákna se rozdělila. Následně bylo upraveno několik dalších hodnot:

- Stuff Speed – Udává rychlost pohybu vláken proti sobě v čase sváření
- Overlap – Udává velikost překryvu obou vláken při sváru
- Prefuse Time – Připravuje vlákno na hlavní výboj
- Prefuse Power – Nastavuje dobu přípravného výboje
- GAP position – Umožňuje posunutí výboje od středu na pravou nebo levou stranu



Obr. 5.2: Zachycené stavy různých svárů

Na obrázku 5.2 jsou zachycené různé případy v průběhu sváření.

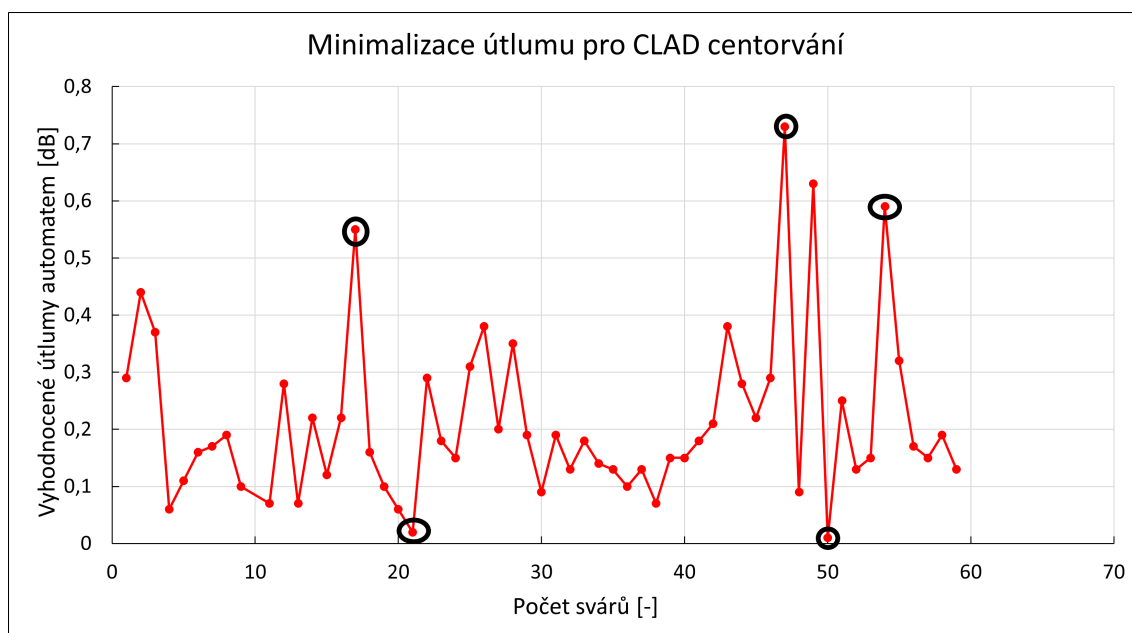
- A. Odpovídá vysokému hlavnímu výboji, při vysokém výkonu mohlo následně dojít k úplnému rozehrátí vláken.
- B. Výsledný obrázek sváru pod úhlem.
- C. Zalomení dvou vláken pod úhlem a zachycení před svárem.
- D. Výsledný svár bez chyby, pouze s vertikálním spojem .
- E. Stav v případě nastavení vysokého přehřívacího výkonu nebo velkém přehřívacím procesu.
- F. V tomto bodě vznikla bublina, která byla odstraněna pomocí zvýšení přehřívacího výkonu. Také se mohla zobrazit při znečištěném vlákně, nebo při sváru zalomením deformovaného vlákna.

5.4 Spojení SMF vlákna s MMF

V tomto kroku bylo sváreno jednovláknové vlákno s mnohavidovým. V telekomunikacích se tohle řešení asi běžně neprovádí, nicméně pro sváření SMF s HCF je to jedna z metod (kapitola 3.4.2). Zároveň bylo vhodné to provést pro získání praktických zkušeností se svářecím automatem. Vlákno bylo tedy nejprve sváreno pomocí základního profilu pro sváření SMF vlákna a následně byl proces upravován, pro získání minimálních ztrát.

5.4.1 Sváření se zarovnáním na plášť

Celý průběh byl zaznamenán do tabulky v Excelu, kterou generuje zvolený svářecí přístroj automaticky s obrovským počtem parametrů. Z dané tabulky pak byla vybrána pouze relevantní data. V tabulce 5.2 a 5.3 jsou vidět různě nastavované parametry. Dále je také možné vidět úhly zalomení, které svářecí automat zaznamenal. Z jednotlivých měření byl vytvořen graf (5.3), který vyhodnocuje jednotlivé sváry z dané tabulky. V průběhu svařování byly sledovány různé výkyvy útlumů. Na označených místech v grafu lze pozorovat různé výkyvy útlumů směrem dolů či nahoru. Většina z těchto bodů indikovala nekvalitní svár, kdy bylo vlákno po svářecím procesu rozpojeno. Poslední řádek v tabulce byl vyhodnocen jako nejvhodnější pro nastavení parametrů pro daný svářecí profil. Výsledná průměrná ztráta svářecího automatu pro zaměření na plášť (CLAD) byla 0,21 dB. Některé sváry byly vyhodnoceny pod 0,2 dB. Při vyhodnocení bylo nalezeno také pár svárů, které vykazovaly útlumy pod 0,1 dB, ale i v tomto případě se svár po lehkém zatažení rozpojil. Při vyhodnocení útlumu svářečkou bylo vždy dobré otestovat svár mechanicky, lehkým zatažením či propnutím vlákna.



Obr. 5.3: Výsledné útlumy jednotlivých svárů pro zaměření na plášť

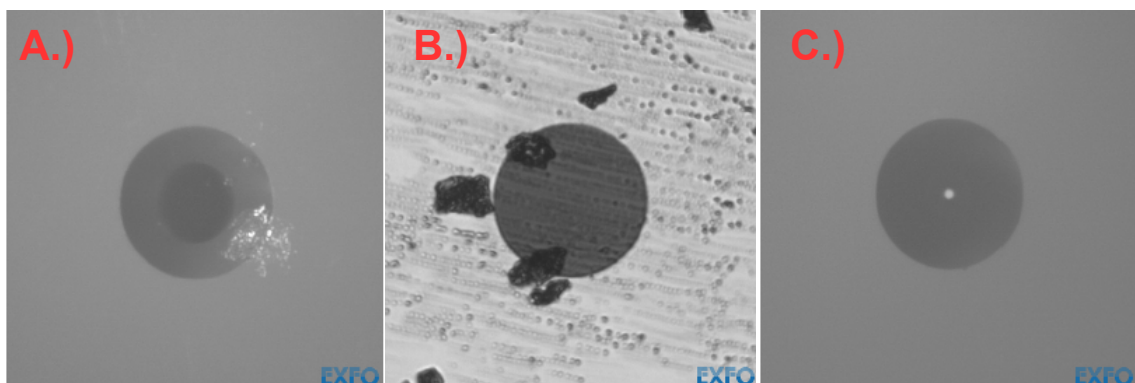
Dále byl profil se zarovnáním na plášť využit pro vyhodnocení na OTDR přístroji. Měření bylo realizováno nejprve při různém zalomení klasickou lámačkou a druhý svár byl vytvořen za použití automatické lámačky. Automatická lámačka minimalizuje odchylky zalomeného úhlu a rozdíly levého a pravého vlákna byly minimální. Pro první měření jsou to hodnoty v tabulce 5.2 a 5.3 pod indexem 59.

Při zalomení automatickou lámačkou byly hodnoty zaznamenány individuálně, úhly zalomení obou vláken vykazovaly hodnoty kolem $0,2^\circ$.

5.4.2 Kontrola a čištění konektorů

Před zapojením svařeného vlákna byla nejprve provedena kontrola konektorů pomocí sondy. Veškeré spoje byly zároveň pro minimalizaci útlumu následně vyčištěny čistícím perem, případně lihovým roztokem. Ke kontrole byla využita sonda, která byla součástí systému OTDR (EXFO FTB-1) od firmy EXFO. Sonda se pomocí USB připojí k OTDR zařízení a v předinstalovaném programu lze provádět kontrolu zakončení konektoru. Sonda prosvítila konektor a uživatel musel zaostřit povrch konektoru. Při velmi silném znečištění program označil problémová místa červeným ohraničením a následně umožnil vygenerovat přehledný report.

- A. Ukázka mírně znečištěného konektoru, který mohl být špinavý od otisků prstu.
- B. Povrch konektoru, který vykazoval silné známky znečištění. Po vyčištění se ukázalo, že není mechanicky poničen.
- C. Kompletně vyčištěný konektor z obrázku B.



Obr. 5.4: Kontrola konektoru pomocí sondy napojené na OTDR přístroj

5.4.3 Vyhodnocení útlumu spoje SMF–MMF

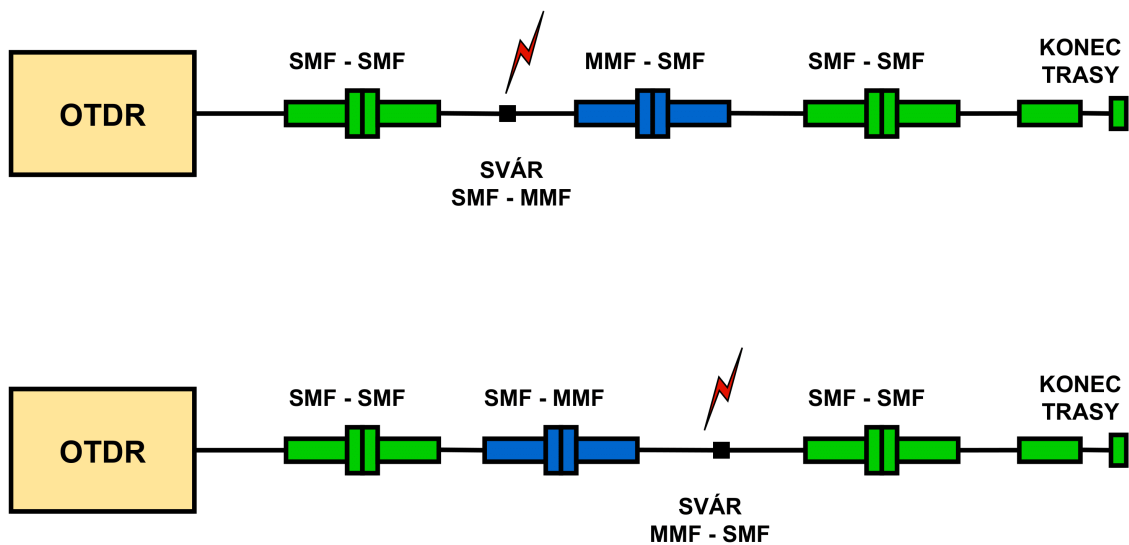
Jednotlivé útlumy byly zaznamenány v tabulce 5.4.3. Vláknem bylo proměřeno v obou směrech, vysvětlení na obrázku 5.5. Bylo také vyzkoušeno prohození pouze svařeného kusu, došlo tedy na propojení modrého a zeleného konektoru. To ale přineslo velmi vysoké ztráty zejména směrem z MMF na SMF.

Pro první index sváru byly útlumy značně vyšší, to mohlo být způsobeno horším zalomením vlákna, nečistotou na konektorech a také použitím nesprávného konektoru. V prvním případě byla cestou zpět vyhodnocena vysoká odrazivost a OTDR

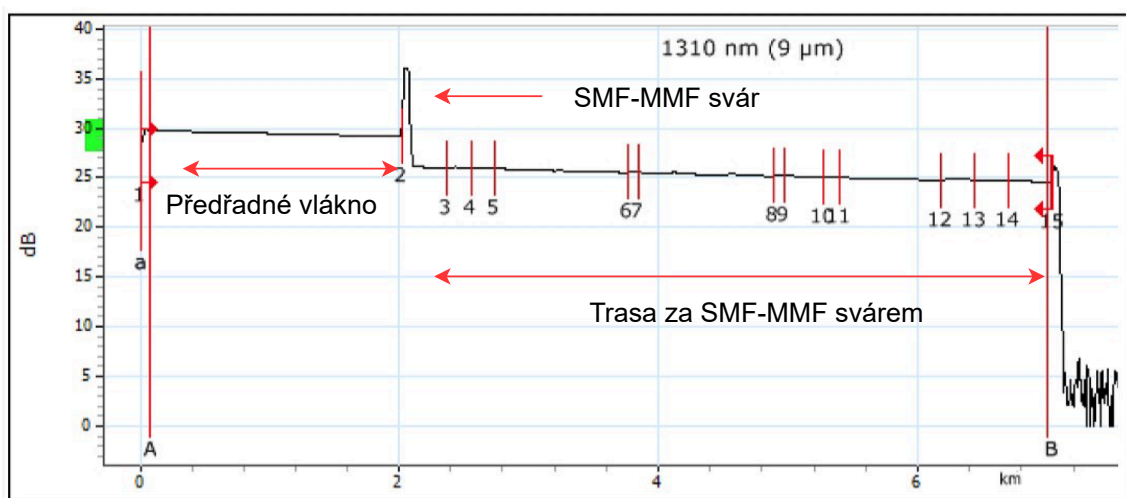
nedokázalo vyhodnotit útlumy, proto byly odečteny z grafu manuálně, a byly tedy zaokrouhleny. Vyhodnocené grafy byly v podstatě podobné, a proto je prezentován pouze pro vlnovou délku 1550 nm pro finální spoj.

Index sváru [-]	Útlum směr 1 (1310 nm)	Útlum směr 1 (1550 nm)	Útlum směr 2 (1310 nm)	Útlum směr 2 (1550 nm)
1	3,138 dB	3,976 dB	9 dB	10 dB
2	2,970 dB	2,120 dB	2,829 dB	2,014 dB

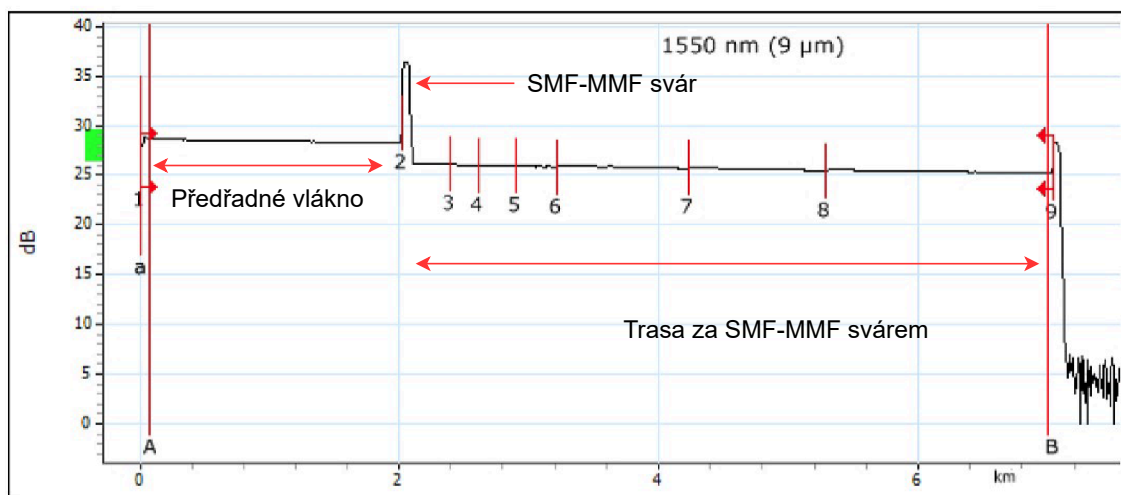
Tab. 5.1: Útlumy SMF–MMF spoje



Obr. 5.5: Zapojení pro měření OTDR



Obr. 5.6: Vyhodnocení sváru SMF–MMF pomocí OTDR (1310 nm)



Obr. 5.7: Vyhodnocení sváru SMF–MMF pomocí OTDR (1550 nm)

V obou případech výše byl problém evidovat útlum přímo na sváru, kvůli krátké délce spoje SMF–MMF (jednotky metrů). Z toho důvodu byly jednotlivé události na spoji vyhodnoceny jako jedna událost, v grafech hned po předřadném vlákne zhruba ve vzdálenosti 2 km. V celkovém útlumu byla zahrnuta událost pro konektor a dva sváry typu SMF-MMF.

Počet svárů [-]	Výkon před svářem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu\text{m}/\text{s}$]	Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L [°]	Zalomení vlákna R [°]
1	0 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	0,6	0,9
2	0 bit	50	10	0,1	30 bit	2000	CENTER	0,2	1,8
3	0 bit	50	10	0,1	50 bit	2000	CENTER	0,8	0,2
4	0 bit	50	10	0,1	-30 bit	2000	CENTER	1,9	0,5
5	0 bit	50	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	0,5	0,8
6	0 bit	50	10	0,1	-10 bit	2000	CENTER	0,7	0,7
7	0 bit	50	10	0,1	-10 bit	2200	CENTER	1,6	1,4
8	0 bit	50	10	0,1	-10 bit	2400	CENTER	0,9	0,8
9	0 bit	50	10	0,1	-10 bit	2300	CENTER	1,2	0,2
11	0 bit	50	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,1	1,3
12	0 bit	50	10	0,14	-10 bit	2300	CENTER	1,4	0,5
13	0 bit	50	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,8	0,5
14	0 bit	50	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,4	0,5
15	0 bit	50	16	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,9	0,6
16	0 bit	50	8	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,1	0,9
17	0 bit	50	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,7	0,6
18	0 bit	50	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,2	1,5
19	0 bit	50	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,1	0,7
20	0 bit	100	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,1	0,7
21	0 bit	130	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,3	0,8
22	0 bit	130	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,8	1,4
23	0 bit	100	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,6	1,9
24	20 bit	100	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,4	0,7
25	20 bit	150	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,4	0,8
26	10 bit	120	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,6	1,7
27	0 bit	120	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,3	0,3
28	0 bit	150	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,8	0,2
29	0 bit	100	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,7	0,6
30	0 bit	80	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,3	1,5
31	0 bit	80	13	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,6	0,5
32	0 bit	80	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,7	1,7
33	0 bit	80	10	0,12	-10 bit	2300	CENTER	0,4	0,6
34	0 bit	80	12	0,12	-10 bit	2300	CENTER	1,1	1,7
35	0 bit	80	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	1,3	0,7
36	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	1,8	0,3
37	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	1,2	0,7
38	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	0,2	1,6
39	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	0,4	0,3

Tab. 5.2: Tabulka parametrů se zarovnáním podle pláště (CLAD) – 1

Počet svárů [-]	Výkon před svářem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu m/s$]	Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L [°]	Zalomení vlákna R [°]
40	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	0,6	0,4
41	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-10	0,4	1,5
42	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-20	1,3	1
43	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-30	1,2	0,3
44	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-50	0,7	0,8
45	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-70	0,5	1,4
46	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	L-90	1,6	0,4
47	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-10	0,9	1,9
48	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-20	0,3	1,3
49	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-30	0,3	1,6
50	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-50	0,1	0,3
51	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-70	0,7	1,1
52	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-90	1,1	0,3
53	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-70	1	1,5
54	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-15	0,9	1,3
55	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	R-10	1,1	0,3
56	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	0,2	0,3
57	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	1,7	0,8
58	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	0,5	0,2
59	0 bit	90	12	0,11	-10 bit	2300	CENTER	1,1	0,2

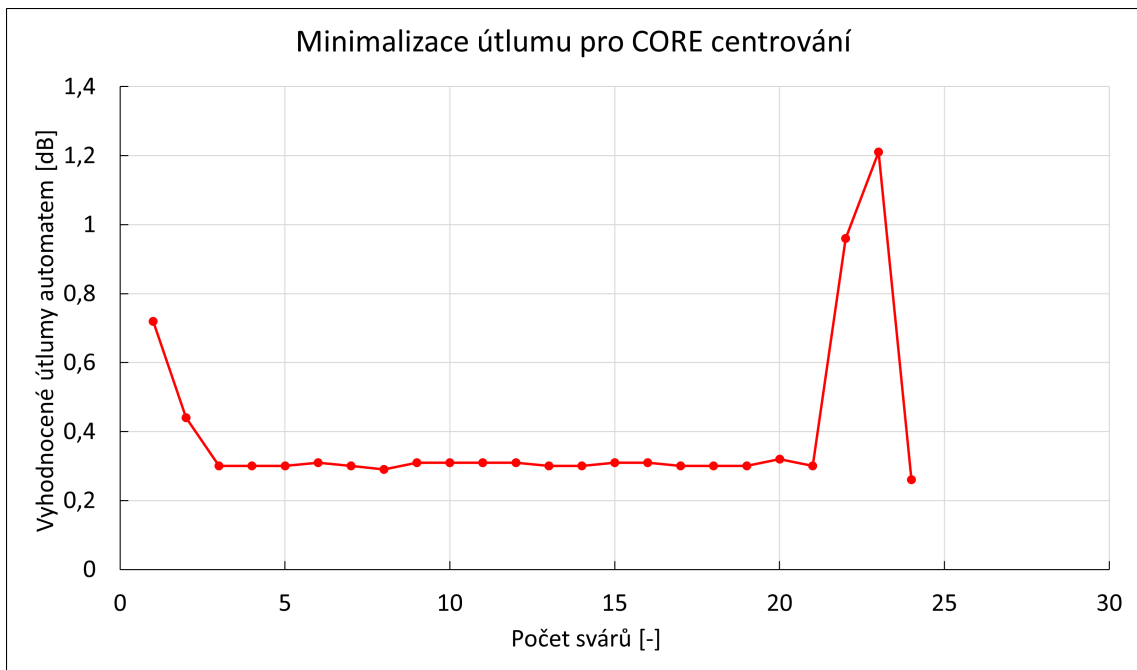
Tab. 5.3: Tabulka parametrů se zarovnáním podle pláště (CLAD) – 2

5.4.4 Sváření se zarovnáním na jádro

V této sekci proběhla úprava na zarovnání vlákna při sváření podle jádra. Nejprve bylo potřeba upravit hodnoty svářecího profilu, které jsou opět v přehledné tabulce 5.4. Hodnoty hlavního výboje jsou odlišné, protože při výsledném sváru došlo ke zúžení vlákna v bodě sváru. Poslední hodnota v tabulce je opět brána jako výsledná. Z přehledného grafu 5.8 je vidět, že se útlum nějakým způsobem neměnil. V poslední části bylo opět pozorováno několik výkyvů, ale ty byly opět ovlivněny mechanickou kvalitou sváru. Výsledný průměrný útlum byl o něco vyšší, a nebylo tedy potřeba přistoupit k vyhodnocení pomocí metody OTDR.

Počet svárů [-]	Výkon před svárem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu\text{m}/\text{s}$]	Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L [°]	Zalomení vlákna R [°]
1	30 bit	150	10	0,1	100 bit	2000	CENTER	0,6	0,9
2	30 bit	150	10	0,1	130 bit	2000	CENTER	1,4	0,9
3	30 bit	150	10	0,1	160 bit	2000	CENTER	0,8	0,2
4	30 bit	150	10	0,1	200 bit	2000	CENTER	1,8	0,7
5	30 bit	150	10	0,1	140 bit	2000	CENTER	2,3	1,1
6	30 bit	150	10	0,1	140 bit	2200	CENTER	1,7	0,5
7	30 bit	150	10	0,1	140 bit	2400	CENTER	1,4	0,6
8	30 bit	150	10	0,1	140 bit	2600	CENTER	0,7	0,2
9	30 bit	150	10	0,1	140 bit	3000	CENTER	2,1	1,1
10	30 bit	150	10	0,1	140 bit	2800	CENTER	0,9	0,8
11	30 bit	150	15	0,1	140 bit	2600	CENTER	0,3	0,7
12	30 bit	150	20	0,1	140 bit	2600	CENTER	1,2	0,4
13	30 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	CENTER	1,8	0,5
14	30 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	CENTER	0,9	0,9
15	40 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	CENTER	2,1	0,9
16	60 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	CENTER	0,5	0,4
17	60 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	L-20	1	0,2
18	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	L-40	1,2	2,2
19	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	L-40	0,8	0,8
20	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	L-100	1,9	0,9
21	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-20	0,9	0,7
22	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-40	0,9	0,8
23	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-40	0,2	0,8
24	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-100	0,9	0,4
25	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-120	1,6	0,5
26	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-115	0,5	0,7
27	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-90	0,4	1,3
28	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-85	1,5	1,1
29	50 bit	150	20	0,15	140 bit	2600	R-95	0,7	0,9

Tab. 5.4: Tabulka parametrů se zarovnáním podle jádra (CORE)



Obr. 5.8: Schéma OTDR [2]

Obr. 5.9: Sváry se zarovnáním podle jádra (CORE)

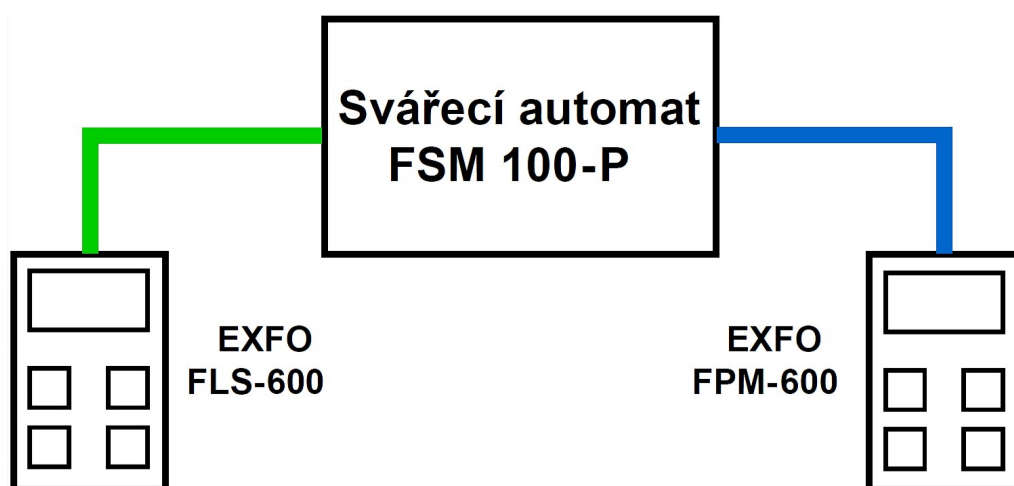
5.4.5 Spojení vlákna SMF a MMF pod různým úhlem zalomení

Pomocí automatické lámačky bylo zalomeno vlákno pod různými úhly. Bohužel i automatická lámačka zalomí vlákna pod nastaveným úhlem s nějakou nepřesností. Zároveň byl občas problém s různým druhem vlákna, které vyžadovalo provést zalomení na několikátý pokus. Při zalomení vlákna byl problém také při nastavení síly tažení při lámání. Například při lámání vlákna MMF bylo vlákno v průběhu napnutí taženo zároveň z primární ochrany. V důsledku toho byla nastavena menší tažná síla, ale při lomu nebylo vlákno dostatečně napnuté a došlo k jeho prohnutí. Docházelo tedy k velké spotřebě při sváření propojovacích kabelů SMF a MMF.



Obr. 5.10: Zalomení vláken pod úhlem

První graf 5.10 byl vytvořen z dostupných vláken v laboratoři. Výsledné sváry však nebyly nikterak vypovídající, proto bylo přistoupeno k navaření propojovacích kabelů, které byly svařeny. Výsledný svár byl proměřen pomocí přímé metody, kdy referenční hodnota odpovídá hodnotě zalomení pod úhlem 0 stupňů. Pro měření bylo využito přístrojů od firmy EXFO, konkrétně zdroje FLS-600 a měřícího přístroje pro výkon FPM-600. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.5. Z výsledků bylo pozorováno, že s rostoucím úhlem dochází ke zmenšení přenášeného výkonu.



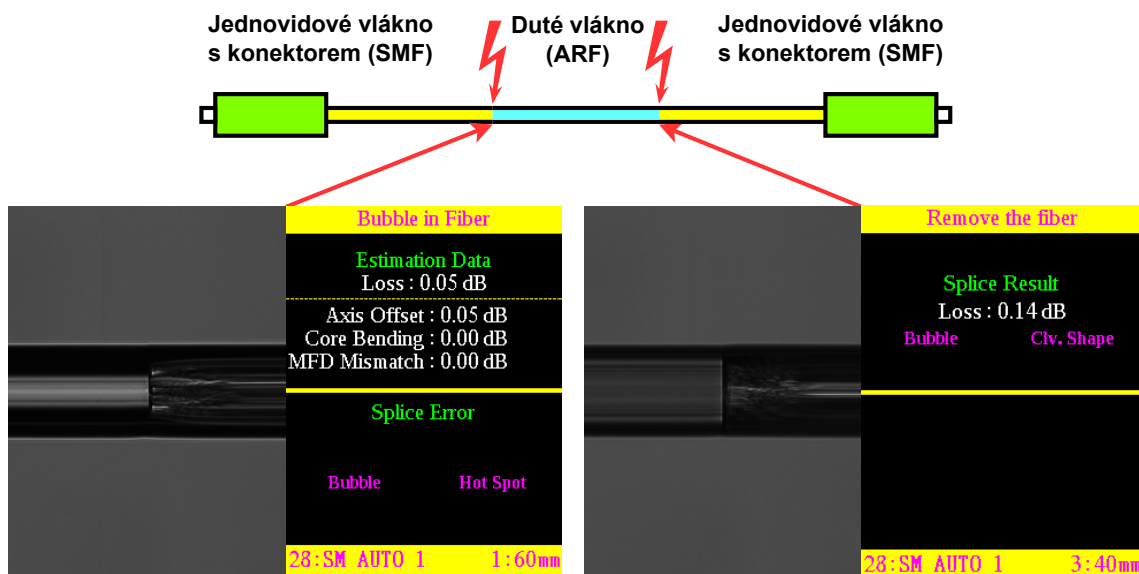
Obr. 5.11: Přímá metoda zapojení

Stupně [°]	0 - ref.	3.4	6.3	8.1
P [dBm] 1310 nm	2.85	2.18	2.53	2.74
P [dBm] 1550 nm	3.40	2.58	2.72	2.83
Útlum [dB] 1310 nm	-	-0.67	-0.32	-0.11
Útlum [dB] 1550 nm	-	-0.82	-0.68	-0.57

Tab. 5.5: Výsledné hodnoty útlumů pro jednotlivé zalomení

5.5 Spojení dutého vlákna a jednovidového vlákna

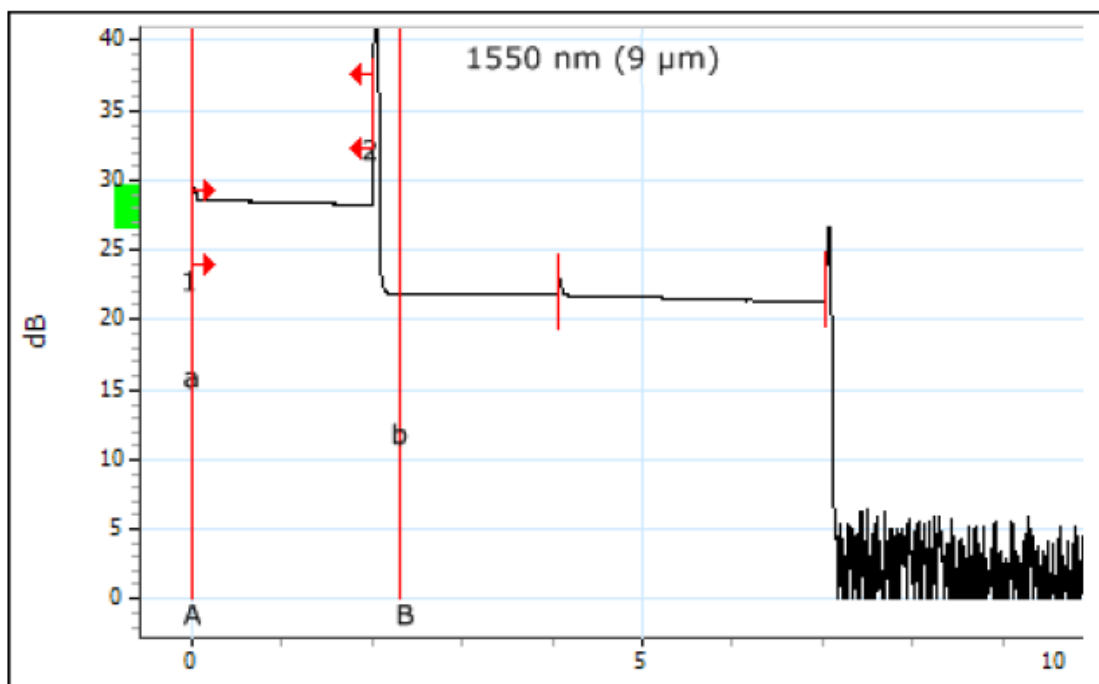
Nejprve byl proveden pouze referenční svár, který by měl být následně v diplomové práci optimalizován pro dosažení nejlepšího útlumu. Vycházelo se tedy pouze ze základního profilu pro jednovidová vlákna, kde musel být přepnut režim zarovnání z jádra na plášť. Při zarovnání podle jádra svářečka vyhodnotila duté vlákno jako silně znečištěné. Následně byl bez jakéhokoliv dalšího nastavení proveden svár, který byl poté proměřen metodou OTDR. Dále byl svár porovnán s již navařeným referenčním dutým vláknem, dodáno z ÚFE AV ČR, která se na výrobu specializuje. Na obrázku 5.12 je vidět výsledný svár z obou stran. Kromě stanovených ztrát vidíme také vertikální spoj, která se objevovala v každém sváru při spojení SMF a MMF. Celkové ztráty sváru byly vyhodnoceny: 0,05 dB pro levý spoj a pro pravý 0,14 dB. Výstrahy výsledného sváru byly v tomto bodě ignorovány.



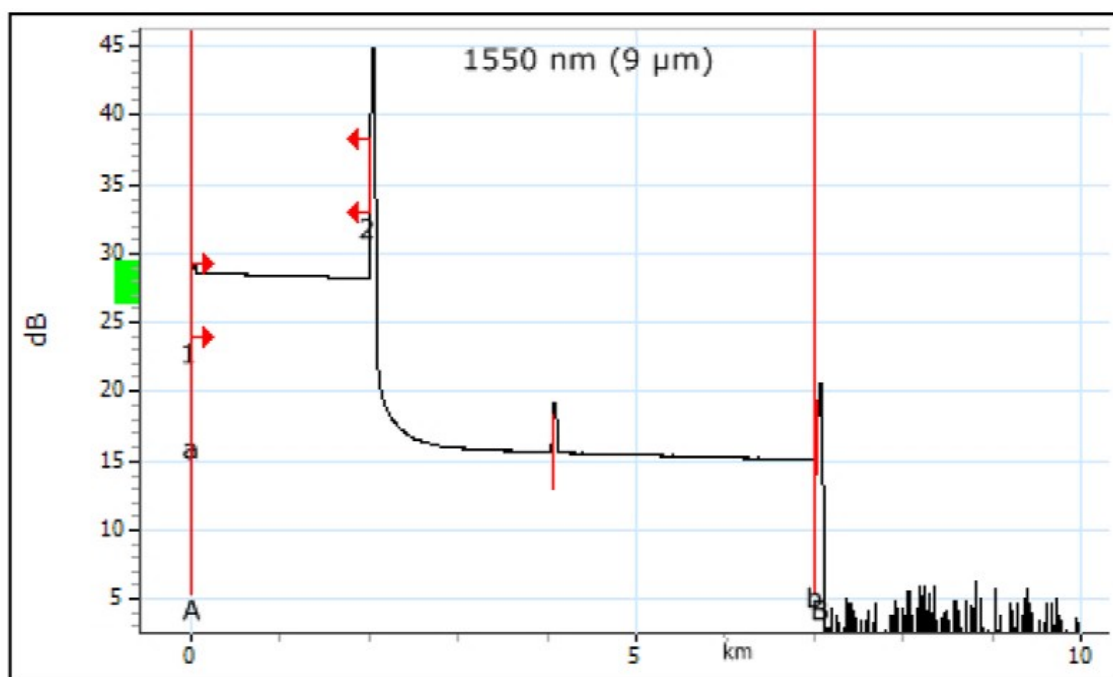
Obr. 5.12: Referenční svár vlákna SMF a ARF

5.5.1 Vyhodnocení útlumu spoje SMF–ARF

Jako referenční vlákno byl otestován spoj SMF–ARF, který pocházel z laboratoře UFE v Praze. Vlákno bylo proměřeno pomocí OTDR na vlnové délce 1550 nm a 1310 nm. Z měření bylo patrné, že na vlnové délce 1310 nm byl zaznamenán vysoký útlum. Po vyžádání dokumentace bylo zjištěno, že je vlákno vytvořeno pro práci na vlnové délce 1550 nm. Dále tedy nebylo žádoucí testovat vlákno pod 1310 nm. Útlum na referenčním sváru byl evidován kolem 7 dB pro oba směry. Přesnější hodnoty byly uvedeny ve výsledné tabulce na konci práce 7.2. Následně byl vyhodnocen svár na námi svařeném spoji SMF–ARF, měření pro 1310 nm bylo opět ignorováno. Hodnota útlumu na vlnové délce byla opět pro oba směry podobná 11 dB. Nevýhodou měření pomocí OTDR bylo splnutí více událostí do jedné. Měřený spoj byl příliš krátký, a tak nebylo z měření patrné, kde je námi realizovaný svár. Realizovaný svár byl schován právě spolu s přechodem na konektoru. V grafech to značí první větší kopeček od předřadného vlákna. Tzn. podle osy x to bylo někde kolem vzdálenosti 2,3 km.



Obr. 5.13: Vyhodnocení útlumu pro referenční spoj SMF-ARF vlákno (1550 nm)



Obr. 5.14: Vyhodnocení útlumu pro vlastní spoj SMF-ARF vlákno (1550 nm)

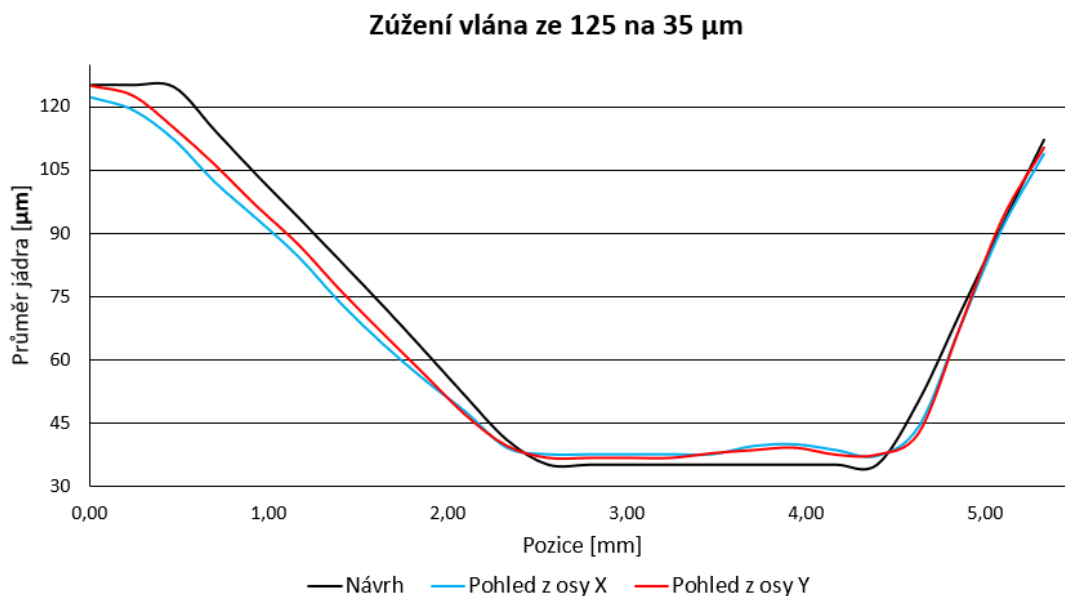
5.6 Zúžení optického vlákna

Zúžení optického vlákna bylo realizováno pomocí svářecího automatu FSM-100P. Nejprve bylo zúžení vlákna provedeno na trénovacím spoji z jednovidového na vícevidové vlákno. Následně by mělo zúžení najít využití při spojení dutého vlákna s jednovidovým. Principem je snížit ztráty způsobené rozdílným průměrem jádra. Cílem zúžení je dostat opláštění ze $125\ \mu\text{m}$ na nějakých $35\text{--}40\ \mu\text{m}$ pro budoucí spoj dutého vlákna s jednovidovým. Vlákna budou spojena na klasický jednovidový pigtail – vlákno zakončené konektorem s pláštěm $125\ \mu\text{m}$ s jádrem $9\ \mu\text{m}$. To znamená, že jádro dutého vlákna musíme zúžit ze $24,9\ \mu\text{m}$ na $9\ \mu\text{m}$.

–	Jednovidové vlákno	Mnohavidové vlákno	Duté vlákno
Jádro [μm]	9	62,5	24,9
Plášť [μm]	125	125	125
Potřebné zúžení [%]	–	14,4 %	36,1 %
Zúžení pláště [μm]	–	18	45,1

Tab. 5.6: Tabulka zúžení

Potřebné zúžení v tabulce udává zúžení pláště na požadované procento. Vzhledem k limitům svářecího automatu nebylo možné realizovat zúžení pod 20 %, avšak v našem případě stačilo vytvořit zúžení na 36,1 %. (Dostat průměr pláště ze $125\ \mu\text{m}$ na $45,1\ \mu\text{m}$. Z grafu 5.15 bylo vidět celkem povedené zúžení, které odpovídá naší požadované hodnotě.)



Obr. 5.15: Zúžené vlákno pomocí automatu FSM-100P

Průměr vlákna [μm]:	125	PARAMETRY ZÚŽENÍ		Rotace:	X
Průměr zúžení [μm]:	35	Předehřev [s]:	0	Rychlost rotátoru [deg/s]:	150
Délka zúžení levé strany [mm]:	2	Absolutní výkon [bits]	180	Mód posunu [mm/s]:	Auto
Délka zúžené sekce [mm]:	2	Relativní výkon [bits]	0	Rychlost tažení [mm/s]:	0,23
Délka zúžení pravé strany [mm]:	1	Přidaný výkon ve zúžení [bits]	0	Sweep motor	X

Tab. 5.7: Nastavované parametry při zúžení vlákna

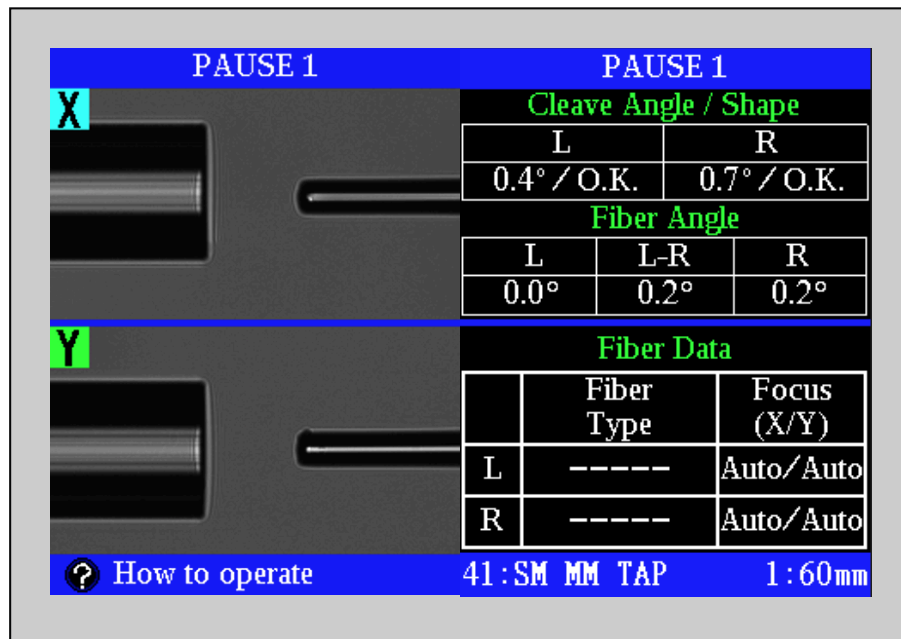
V tabulce 5.7 byly uvedené parametry, které byly použity při zúžení vlákna ze 125 μm na 35 μm . Přitom asi největší vliv na výsledné zúžení bylo nastavení právě absolutního výkonu a rychlost tažení. V případě vysokého absolutního výkonu bylo pozorováno větších odchylek zúžení vůči plánovanému zúžení. Při pokusu o zúžení ze 125 μm na 20 μm docházelo k častému nepřesnému zúžení. Bohužel absolutní výkon byl nastaven na minimální hodnotu 180 bit, a tedy nešlo tímto způsobem nepřesnost eliminovat. Občas bylo také pozorováno nepřesné zaostření kamery automatu, které opět vedlo k odchylkám při měření výsledného zúžení.

5.6.1 Svár zúženého vlákna

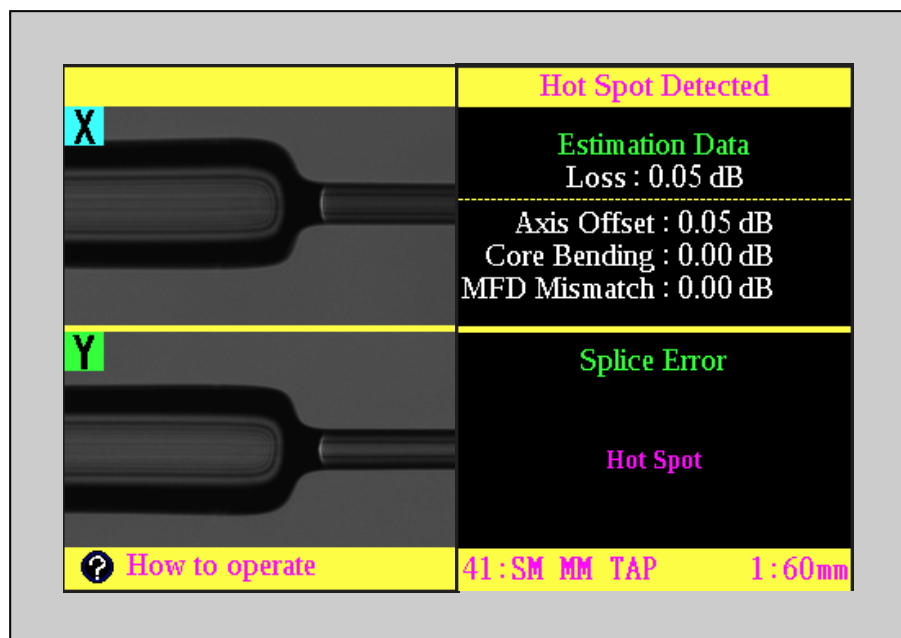
Po úspěšném zúžení bylo potřeba vlákno navařit na konec druhého vlákna. V případě pokusu bylo opět vycházeno ze spoje MMF na SMF. Ještě před svárem bylo potřeba vyřešit problém se zalomením vlákna. Klasická zalamovačka často neprovedla zalomení bez deformace. Bylo využito tedy automatické, která má doporučený průměr vlákna od 80 μm do 125 μm . Na automatické lámačce bylo nastaveno minimální pnutí vlákna a zároveň bylo prstem vlákno opatrně napnuto, aby nebylo při zalomení prohnuté. Další problém byl pozorován v případě samotného sváru, jelikož byl průměr mnohavidového vlákna 35 μm bylo opět potřeba přenastavit náš svářecí profil. Svářecí profil byl upraven tak, aby nedocházelo k přetavení spoje a byla zachována pevnost. Při zhotovení sváru bylo pozorováno rozpojení na základě automatického testu pevnosti svářecího automatu. K rozpojení došlo na straně zúženého vlákna, tedy mimo provedený svár. Při dalším sváru bylo tedy vlákno vytaženo ze svářecího automatu před automatickým testem pevnosti.

Na následujícím obrázku 5.16 bylo možné pozorovat parametry vyhodnocené těsně před svárem. Z obrázku 5.17 je patrné, že bylo realizované zalomení, které nezpůsobilo deformaci vlákna na jeho konci. Pro zúžené vlákno bylo zalomení 0,7°. Na dalším obrázku bylo možné pozorovat stav spoje po procesu svaření. Chybová hláška "Hot Spot" dle manuálu poukazuje na horší očištění jednoho z vláken, nicméně

tato hláška nás doprovázela při každém sváru takového druhu. Stejně jako dříve zmíněná vertikální čára při sváru dvou rozdílných vláken (resp. díky jejich rozdílným průměrům jádra).



Obr. 5.16: Vlákno před svárem



Obr. 5.17: Zúžené vlákno po svaření

6 Optimalizace spoje dutého vlákna

V této části práce byla provedena optimalizace při spojení jednovidového vlákna s dutým. Již hotový spoj byl z jedné strany rozebrán a následně svářen s různými parametry svářecího procesu. Ze získaných zkušeností ze semestrální práce byl svár rovnou měřen pomocí přímé metody. Dostupné přístroje neumožňovaly oboustranné měření spoje, takže došlo vždy k prohození přístrojů. To nám mohlo vnést do našeho postupu nějakou nepřesnost, ale šlo o trasu čítající pouze několik metrů.

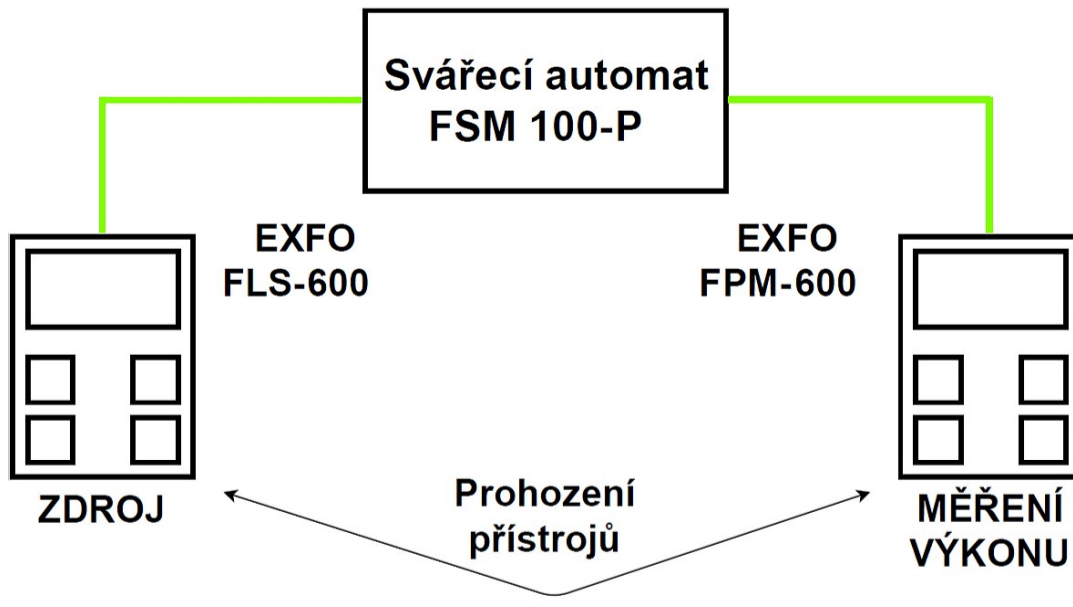
6.1 Parametry dutého optického vlákna

Vlákno pochází z UFE – Ústav fotoniky a elektroniky v Praze. Parametry vlákna byly vyčteny z odborné zprávy, která pochází právě z UFE. Vlákno bylo vyrobeno ze syntetického křemene pro hlavní pracovní délku 1550 nm. Po výrobě bylo proměřeno ve vlnových intervalech a na vlnové délce 1650 nm mu byl naměřen měrný útlum zhruba 0,4 dB/m. Pro vlnovou délku 1080 nm byl naměřen měrný útlum 0,6 dB/m. Technické parametry vlákna jsou:

- Průměr jádra: 24,9 μm
- Průměr pláště: 125 μm
- Průměr pokryvu: 250 μm
- Průměr vnějších kapilár: 14,7 μm
- Průměr vnitřních kapilár: 12,1 μm
- Počet kapilár: 6
- Materiál pokryvu: Akrylát
- Průměr vlákna: Syntetický křemen

6.2 Spojení jednovidového vlákna s dutým

Duté vlákno bylo z obou stran napojené s klasickými jednovidovými zakončovacími kabelem (pigtaily), přičemž byla nejprve optimalizována jedna strana. Výchozí svár daného spoje vytvořený pomocí základního profilu pro jednovidová vlákna vykazoval vysoký útlum. Postupně byla provedena změna různých parametrů a pomocí přímé metody byla sledována změna útlumu. Z prvních pokusů byla patrná deformace struktury dutého vlákna.

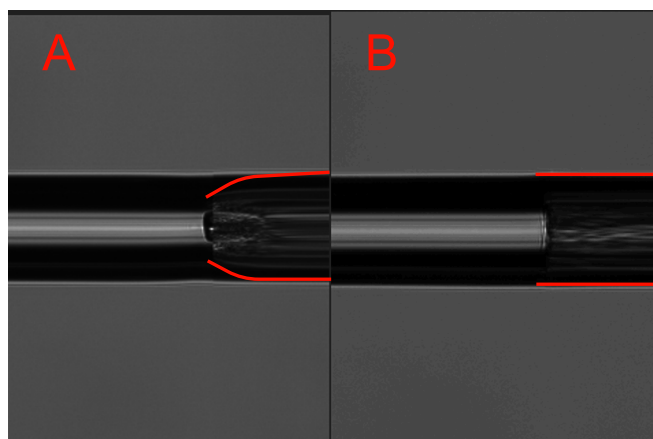


Obr. 6.1: Optimalizace svářecího procesu

Veškeré naměřené hodnoty z přímé metody byly zaznamenány do přehledné tabulky 5.5. Z prvních výsledků byl evidován útlum zhruba kolem 16 dB. Při finálním proměření byla zaznamenána změna na necelých 7 dB, takže se podařilo zmenšit útlum víc než o polovinu. Dále byla v práci uvedena také tabulka změn 6.1, které byly upravovány na svářecím automatu v průběhu měření. Tabulka obsahuje přehledné změny, které byly upraveny během svářecího procesu a zároveň číslo sváru odkazuje na index měření v tabulce 5.5. Upravené parametry:

- Výkon přehřívacího výboje (Prfuse arc)
- Délka přehřívacího výboje (Prefuse time)
- Rychlost podávání (Stuff speed)
- Hlavní výboj (Main arc)
- Čas hlavního výboje (Main arc time)
- Pozice výboje (GAP position)

Během měření bylo vyzorováno, že na deformaci jádra dutého vlákna nejvíce podílí vysoký výkon přehřívacího výboje. Ten byl následně upravován tak, aby k deformaci nedocházelo. Na obrázku 6.2 je zachycen rozdíl deformace mezi prvním a posledním svářem. Na první pohled nebylo vše zcela patrné, proto byly přidány vodící červené čáry, které ukazují deformaci struktury dutého optického vlákna. Případ *A* znázorňuje poškození struktury dutého vlákna, případ *B* bez poškození struktury HCF.



Obr. 6.2: A - Poškozená struktura HCF, B - HCF bez poškozené struktury

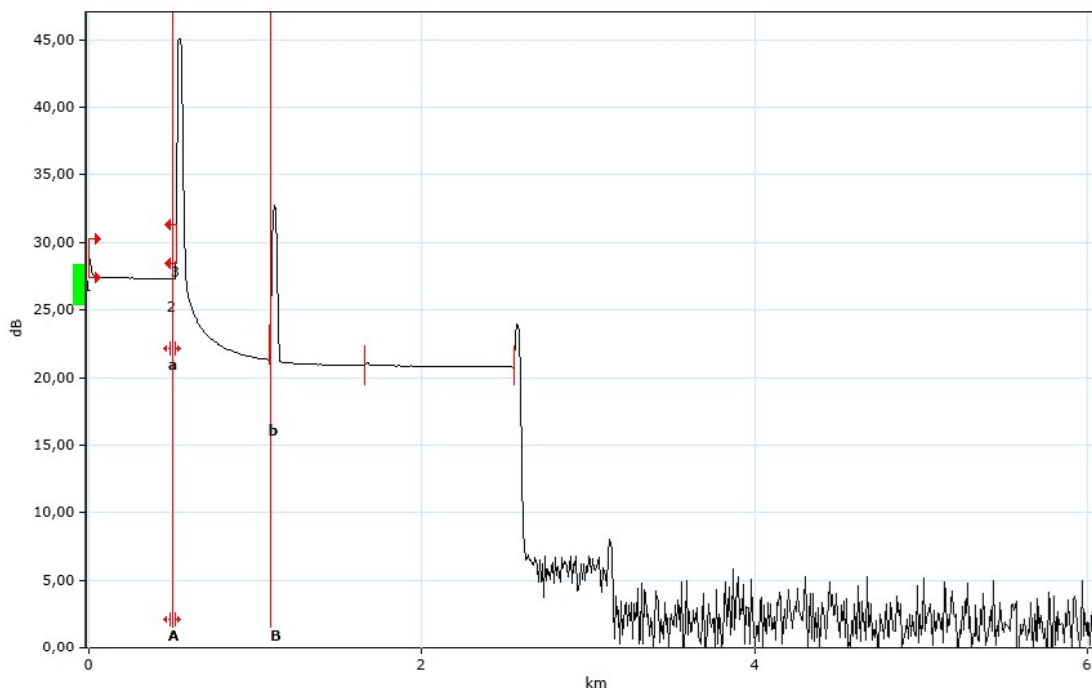
Dalším zásadním parametrem byl hlavní výboj, který měl vliv na pevnost spoje. Ten byl v práci snížen a také posunut vůči středu sváru. Posun byl proveden na straně jednovidového vlákna a nastaven na hodnotu $R - 30$. Při této hodnotě nebylo evidováno rozpojení na základě mechanického testu. Postup byl aplikován na druhou stranu, ale zde docházelo k rozpojení. V tomto případě byla hodnota posunu ponechána na $R - 30$ a byla navýšena hodnota výkonu hlavního výboje na -40 bit, aby byl spoj pevnější. Vlákně na druhé straně mohlo být nejspíše trošku odlišené, ale na výsledném útlumu se to příliš neprojevílo. Výsledné nastavení pro daný spoj je v tabulce 6.1 pod číslem sváru 41.

Počet svárů [-]	Výkon před svářem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu\text{m}/\text{s}$]	Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L [°]	Zalomení vlákna R [°]
1	0 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	0,5	0,1
2	-50 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	0,6	2
3	-100 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	1,3	0,4
4	-150 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	1,6	1
5	-125 bit	50	10	0,1	0 bit	2000	CENTER	1,1	0,3
6	-125 bit	50	10	0,1	-20 bit	2000	CENTER	2,1	0,3
7	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	1	1,4
8	-125 bit	50	10	0,1	-75 bit	2000	CENTER	0,2	0,4
9	-125 bit	50	10	0,1	-60 bit	2000	CENTER	0,4	0,2
10	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	0,8	1,2
11	-125 bit	50	10	0,12	-50 bit	2000	CENTER	1,1	0,2
12	-125 bit	50	10	0,14	-50 bit	2000	CENTER	2,4	2,1
13	-125 bit	50	10	0,14	-50 bit	2000	CENTER	1,6	1,1
14	-125 bit	50	10	0,08	-50 bit	2000	CENTER	1,6	0,3
15	-125 bit	100	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	1,7	0,4
16	-125 bit	0	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	0,6	1
17	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	0,4	0,2
18	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2000	CENTER	0,9	0,6
19	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2300	CENTER	1,3	0,2
20	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2600	CENTER	0,3	0
21	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	1700	CENTER	0,9	1,1
22	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	CENTER	1,3	0,8
23	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-10	0,8	0,7
24	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-20	0,7	0,8
25	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	1,2	1,1
26	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-40	0,6	0,6
27	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-40	0,8	0,7
28	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-50	1,3	0,9
29	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-50	0,4	0,3
30	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-40	1	0,5
31	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-35	0,9	0,7
32	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-35	1,2	0,4
33	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,8	0,1
34	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,6	0,9
35	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,9	0,5
36	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	1,4	0,4
37	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,8	0,2
38	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,5	0,3
39	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	0,7	0,6
40	-125 bit	50	10	0,1	-50 bit	2200	R-30	1,3	0,9
41	-125 bit	50	10	0,1	-40 bit	2200	R-30	1,3	0,9

Tab. 6.1: Výsledná tabulka jednotlivých svárů

6.2.1 Vyhodnocení útlumu spoje SMF–ARF

Kromě průběžného vyhodnocení byla použita také metoda OTDR, abychom mohli porovnat referenční vlákno s naším optimalizovaným spojem. Výsledné hodnoty z měření pomocí přímé metody byly uvedeny v tabulce 6.2. V tabulce jsou některé buňky označené červeně, ty znázorňují neúspěšný svár (vysoký útlum, rozpojení na základě testu pružnosti, atd). Dále v tabulce chybí pár indexů měření, ty se nepodařilo změřit. Při posledním sváru byl naměřen pomocí přímé metody útlum 6,9 dB z obou stran. Stejně jako u přímé metody bylo vlákno proměřeno pomocí OTDR z obou směrů. Hodnoty byly nepatrně odlišené a po zaokrouhlení byl vyhodnocen útlum spoje 7,2 dB. Průběh je zobrazen na grafu 6.3. Vzhledem k podobnosti grafů nebylo třeba vytvářet graf pro oba směry. Měření pro vlnovou délku 1310 nm nebylo realizováno, protože vlákno bylo navrženo pro jiné pracovní délky. Výslednou hodnotu útlumu lze považovat za úspěch, protože se podobá referenčnímu vláknu, u kterého byl odečten útlum kolem 8 dB. Útlum celé trasy byl v našem případě zcela irelevantní, protože bylo měření provedeno na odlišené trase oproti semestrální práci. V aktuální fázi byla evidentní nevýhoda vysokého zpětného odrazu, která by měla být dále potlačena. V tabulce 6.3 byly zapsány nastavené parametry při měření metodou OTDR.

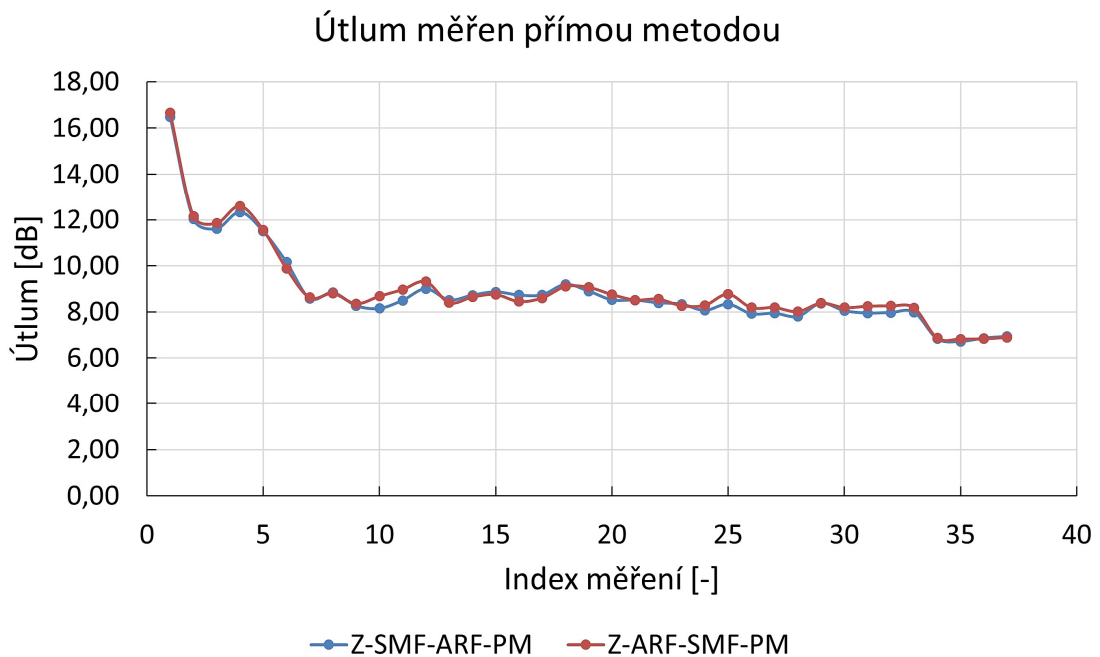


Obr. 6.3: Optimalizovaný spoj SMF–ARF pro vlnovou délku 1550 nm

Index měření [-]	Z-SMF-ARF-PM		PM-SMF-ARF-Z	
	P2 - 1550 nm [mW]	Útlum 1550 nm [dB]	P2 - 1550 nm [mW]	Útlum 1550 nm [dB]
1	2,45E-05	-16,491	2,35E-05	-16,660
2	6,82E-05	-12,036	6,63E-05	-12,160
3	7,52E-05	-11,615	7,12E-05	-11,849
4	6,37E-05	-12,336	5,99E-05	-12,598
5	7,71E-05	-11,504	7,61E-05	-11,559
6	1,05E-04	-10,162	1,12E-04	-9,890
7	1,51E-04	-8,584	1,50E-04	-8,625
8	1,43E-04	-8,836	1,44E-04	-8,800
9	1,62E-04	-8,268	1,59E-04	-8,355
10	1,67E-04	-8,150	1,48E-04	-8,680
11	1,54E-04	-8,499	1,38E-04	-8,969
12	1,37E-04	-9,004	1,28E-04	-9,312
13	1,53E-04	-8,516	1,58E-04	-8,401
14	1,46E-04	-8,725	1,49E-04	-8,645
15	1,42E-04	-8,867	1,45E-04	-8,755
16	1,46E-04	-8,731	1,56E-04	-8,451
18	1,46E-04	-8,737	1,50E-04	-8,602
19	1,31E-04	-9,192	1,34E-04	-9,100
20	1,40E-04	-8,904	1,35E-04	-9,068
21	1,53E-04	-8,522	1,45E-04	-8,755
22	1,54E-04	-8,510	1,53E-04	-8,516
23	1,58E-04	-8,393	1,52E-04	-8,553
24	1,60E-04	-8,336	1,62E-04	-8,271
26	1,70E-04	-8,065	1,62E-04	-8,287
28	1,60E-04	-8,333	1,45E-04	-8,773
30	1,76E-04	-7,919	1,66E-04	-8,184
31	1,75E-04	-7,939	1,65E-04	-8,189
32	1,81E-04	-7,802	1,72E-04	-8,011
33	1,58E-04	-8,377	1,58E-04	-8,379
34	1,71E-04	-8,052	1,66E-04	-8,186
35	1,75E-04	-7,949	1,63E-04	-8,247
36	1,74E-04	-7,971	1,63E-04	-8,255
37	1,73E-04	-7,989	1,66E-04	-8,181
38	2,26E-04	-6,829	2,24E-04	-6,868
39	2,32E-04	-6,716	2,27E-04	-6,822
40	2,25E-04	-6,860	2,26E-04	-6,831
41	2,21E-04	-6,934	2,23E-04	-6,897

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty pomocí přímé metody

Kromě tabulek byl zhotoven také obrázek 6.4, který udává všechna platná měření z předešlé tabulky. Z grafu bylo patrné, že byl útlum po celou dobu snižován, až na pár výjimek. Pokusy byly ukončeny u posledního sváru s indexem 41. Několik řádově jednotek posledních svárů byly provedeny jako kalibrační sváry, aby mohl být námi vytvořený profil vyhodnocen jako funkční. V průběhu sváření bylo vyzkoušeno několik změn v nastavení svářecího automatu a následně už nebyla vidina lepšího útlumu pouhým nastavením svářecího procesu.



Obr. 6.4: Graf pro měření spoje SMF–ARF přímo metodou

Vlnová délka [nm]	Vzdálenost [km]	Pulz [ns]	Délka měření [s]
1550	10	275	30

Tab. 6.3: Nastavené parametry na přístroji OTDR

6.3 Provedení sváru pro zalomení vlákna pod úhlem

V předešlé části byl úspěšně sestaven svářecí profil pro spojení jednovidového vlákna s dutým (SMF–ARF). Podařilo se nám zde snížit útlum spoje, ale při měření pomocí OTDR byl zaznamenán vysoký zpětný rozptyl. To bylo dáno rozdílnými průměry jader, která vedou optický signál. Velikost zpětného rozptylu byla redukována právě zalomením vlákna pod určitým úhlem. Pro zalomení byla využita již dříve zmíněná

automatická lámačka optických vláken *Fujikura CT 101/102*. Při této metodě byl pozorován jev rostoucího útlumu při zvětšování úhlu zalomení. Oproti tomu byl snížen zpětný rozptyl, který se šíří od sváru přímo zpět ke zdroji.

Zalomení vlákna pod úhlem bylo časově náročné. Aby nedocházelo k velké spotřebě dutého vlákna byl proces trénován na klasických jednovidových vláknech dostupných v laboratoři. Zpočátku bylo vlákno zalomeno bez větších deformací, s překročením úhlu 5° se hlavně duté vlákno začalo značně deformovat. V tomto bodě bylo patrné, že nastavení podle jednovidového vlákna nedává vůbec smysl. Při lámání se ukázalo, jak velkou roli hraje také druh vlákna. Pro duté vlákno proběhla úprava napnutí při zalomení a bylo vybráno několik úhlů, u kterých byla deformace minimální. V tabulce 6.4 jsou uvedeny přibližné hodnoty zalomení. Vyhodnocení úhlu bylo provedeno pomocí svářecího automatu a při stejném nastavení lámačky byl úhel obou druhů vláken rozdílný. Snaha byla přiblížit se k úhlu, který je uvedený v tabulce s námi stanovenou odchylkou $\pm 0,5^\circ$.

Index měření [-]	Úhel zalomení [°]	Zpětný rozptyl [dB]	Útlum [dB]
0	0	-21,9	5,63
1	1,5	-22,2	8,29
2	3,0	-24,0	8,34
3	5,0	-27,2	8,63
4	7,0	-30,3	10,47
5	10	-34,4	12,32

Tab. 6.4: Tabulka pro různé úhly zalomení

Na obrázku níže 6.6 byl zaznamenán průběh pro svár pod úhlem zalomení 10° . V průběhu práce bylo také vyzkoušeno zalomení přes 10° , ale zde byla evidována silná deformace vlákna a při proměření byla hodnota útlumu přes 13 dB. Taková hodnota už byla blízká pro svár bez optimalizace a nebyla tedy relevantní. Cílem této metody bylo snížit zpětný rozptyl, ale zachovat co nejnižší hodnotu útlumu.

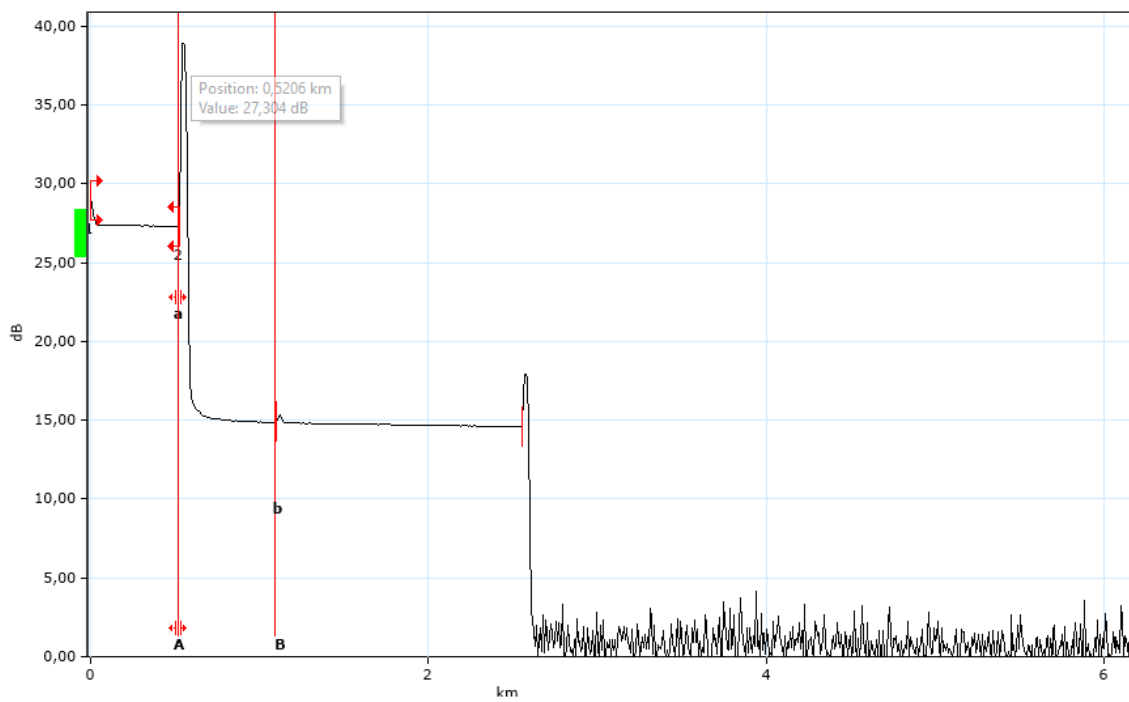
Dále byl vytvořen graf 6.7, ve kterém může být pozorována změna útlumu a zpětného rozptylu v závislosti na různém úhlu zalomení obou vláken. Dle teorie bylo dosaženo podobných výsledků, kde bylo pozorováno zvýšení útlumu s rostoucím úhlem zalomení. Ve spodní části grafu byl znázorněn pokles zpětného rozptylu, který klesal s rostoucím úhlem zalomení.

V této části byla tedy ověřena závislost zpětného rozptylu na úhlu zalomení vlákna. Na druhou stranu s klesajícím zpětným rozptylem byl zaznamenán také značný nárůst útlumu. Proces zalomení by mohl být dále optimalizován tak, aby

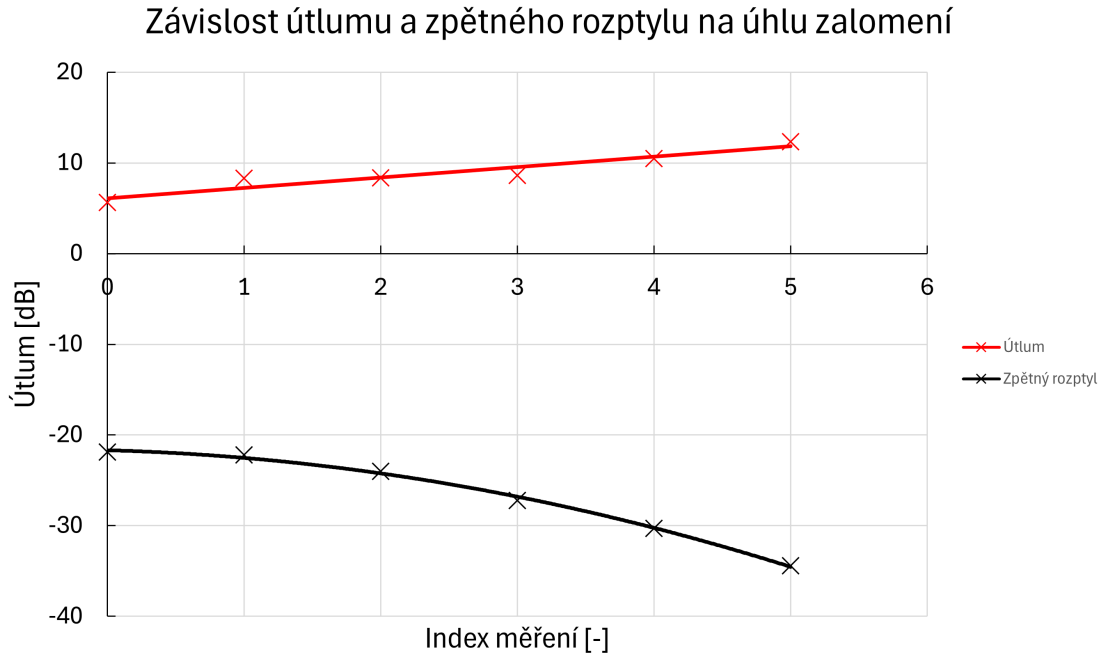
byla obě vlákna zalomena bez výrazných deformací. Námi bylo dosaženo snížení zpětného rozptylu na -34,4 dB při útlumu 12,32 dB.



Obr. 6.5: Zalomení pod úhlem



Obr. 6.6: Vyhodnocení útlumu při zalomení pod úhlem 10 stupňů



Obr. 6.7: Graf pro získané útlumy a zpětné rozptyly

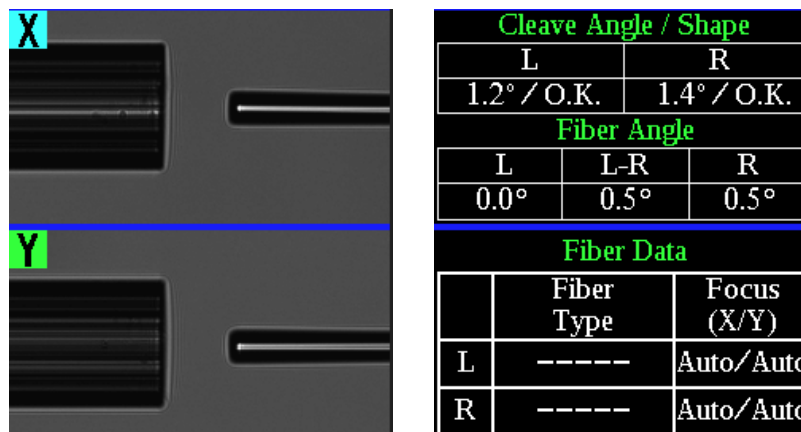
6.4 Duté vlákno a optimalizace pomocí zúžení vlákna

V této sekci bylo vyzkoušeno zúžení dutého optického vlákna a také jednovidového vlákna. Cílem zúžení dutého vlákna byla minimalizace ztrát, které mohou být způsobené rozdílným parametrem MFD. Nejprve bylo zúženo duté optické vlákno a následně bylo navařeno na jednovidové. Zúžení dutého optického vlákna bylo vyhodnoceno jako velmi nepraktický proces pro naše potřeby. Přenosová charakteristika dutého vlákna byla nastavena již z výroby a zúžením došlo nejspíše k velmi výrazné změně v přenosové charakteristice. Největší podíl na přenosových vlastnostech má totiž velikost jádra a kapilár, jejichž velikost byla zúžením změněna.

Bylo tedy přistoupeno ke zúžení jednovidového vlákna, které bylo postupně zúženo ze $125 \mu m$ na 80 , 60 , 40 a $30 \mu m$. Cílem bylo pomocí zúžení dosáhnout hodnoty zúžení kolem $20 \mu m$, ale při nižších hodnotách byl proces zúžení značně nepřesný. Metoda byla převzatá z teoretické části, kdy došlo ke zúžení vlákna na velikost průměru jádra dutého vlákna. Následně bylo jednovidové vlákno vloženo do jádra dutého vlákna a spoj byl stvrzen pomocí lepidla. V našem případě byla zúžená část jednovidového vlákna navařena na konec dutého vlákna. Při klasickém sváru byl výboj posunut na stranu, kde bylo vlákno méně náchylné na deformaci. V tomto případě byly obě strany velmi citlivé na vysoký svářecí výkon a předehřev. Nebylo tedy možné vytvořit svár, který by byl podobný sváru z obrázku 5.17. V jednom

případě bylo pozorováno, že deformace struktury na straně dutého vlákna pomohla ke snížení zpětného rozptylu a metoda OTDR vyhodnotila spoj jako úspěšný. Negativem snižování výkonu byla náchylnost spoje na rozpojení přímo v místě sváru.

Na obrázku níže je zobrazeno zalomení zúženého vlákna na $30 \mu m$, které bylo následně spojeno s dutým vláknem. Přes hroší kvalitu zalomení se podařilo zalomit zúžené vlákno pod toleranci 2° .



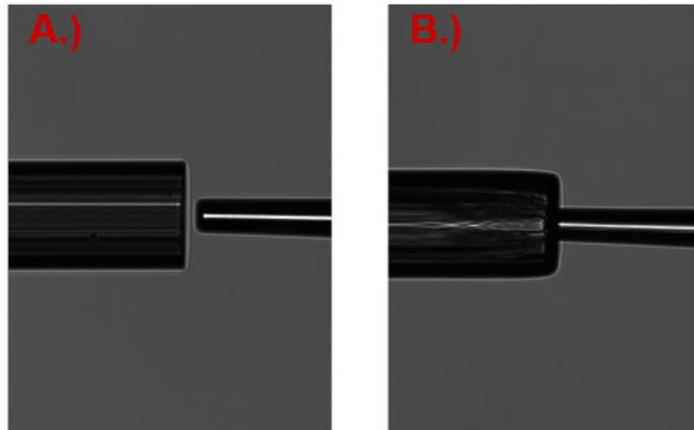
Obr. 6.8: Spoj SMF-ARF (zúžené) před svárem

Index sváru [-]	Požadovaný průměr zalomení [μm]	Výsledný útlum [dB]	Zpětný odraz [dB]
1	30	11,15	-27,80
2	40	19,20	-37,30
3	40	14,72	-27,70
4	60	16,03	-36,6
5	60	19,380	-47,5
6	80	20,07	-44,4

Tab. 6.5: Výsledná tabulka jednotlivých sváru při zúženém SMF

V tabulce výše byly uvedeny jednotlivé sváry, při kterých bylo napojeno dutého vlákna na zúžené jednovidové. Zúžení vlákna bylo vždy prováděno ze $125 \mu m$ na požadované zúžení uvedené v tabulce. U některých sváru bylo evidováno snížení zpětného rozptylu, např. svár pod indexem 5, 6. Tento jev byl však způsoben vyšším svářecím výkonem a za snížení zpětného rozptylu mohla spíše deformace dutého vlákna, u které došlo vlivem sváru také ke zúžení. Z pohledu zpětného rozptylu by mohl být svár akceptovatelný, bohužel vlivem deformace došlo také ke zvýšení

útlumu na spoji. Dále byl snižován výkon hlavního výboje a předeřevu, aby nedocházelo k deformaci dutého vlákna. Ovšem u takového sváru docházelo k horší mechanické pevnosti a také byl evidován prakticky stejný zpětný rozptyl pro různá zúžení, který se pohyboval kolem -27 dB. Jedním z lepších zpětných rozptylů lze vidět u sváru pod indexem 6, ale zde bylo vlákno zalomené pod úhlem zhruba 6°, výsledný zpětný odraz byl -36,6 dB. Na obrázku 6.9 byla zobrazena deformace struktury dutého vlákna již po úpravě svářecího profilu.



Obr. 6.9: A.) Zúžené SMF před svárem, B.) Spojení zúženého SMF s ARF

6.5 Optimalizace svářecího procesu pro duté vlákno typu nested ARF

Z ústavu fotoniky a elektroniky bylo dodáno nové duté vlákno, které fungovalo na principu antirezonance, ale má uvnitř kapilár vnořené další kapiláry – nested ARF (dále pouze jako NARF). Dalším rozdílem oproti našemu prvnímu vzorku byl větší průměr jádra 33,74 μm . Ztráty způsobené rozdílným MFD budou tedy o něco větší než u předchozího testovaného vlákna. Pro výpočet MFD bylo vycházeno z rovnice 3.2

$$\alpha = -20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \omega_{HCF} \cdot \omega_{SMF}}{\omega_{HCF}^2 + \omega_{SMF}^2}\right) \quad (6.1)$$

$$\alpha = -20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot 23,62 \cdot 9,2}{23,62^2 + 9,2^2}\right) = 3,51 \text{ dB} \quad (6.2)$$

U dutého vlákna byl parametr MFD stanoven vynásobením průměru jádra hodnotou 0,7. U jednovidového vlákna bylo počítáno s typickou hodnotou 9,2 μm pro typ G.657. Výsledná hodnota po dosazení do rovnice byla stanovena na 3,51 dB pro nested vlákno a 1,66 dB pro předchozí vlákno.

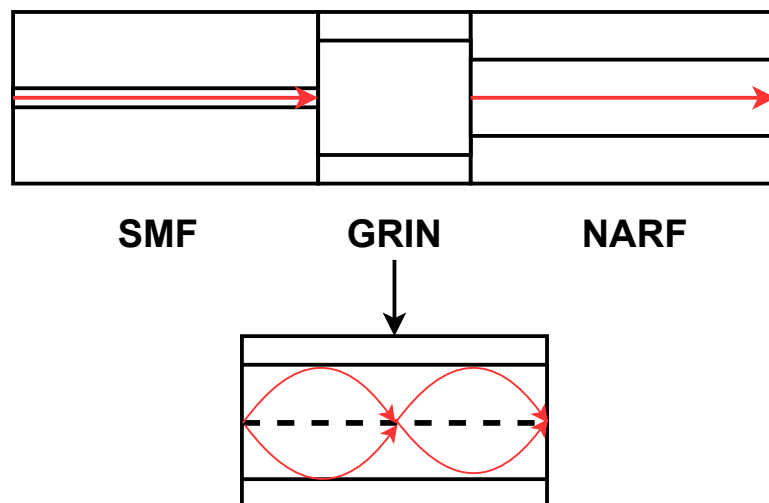
Při sestavování svářecího procesu bylo vycházeno z předešlého natavení pro dutá vlákna, avšak při sváru byla viditelná destrukce jeho struktury. Proces byl tedy lehce přenastaven, aby bylo eliminováno poničení dutého vlákna. Ve výsledku stačilo upravit dobu předehřevu a zpevnit svár zvýšením výkonu hlavního výboje.



Obr. 6.10: Spojení SMF–NARF

6.6 Spojení jednovidového vlákna s dutým skrze mnohavidové vlákno

Při této svářecí metodě bylo využito krátkého mnohavidového vlákna typu GRIN (Graded Index Fiber – Vlákno s gradientní změnou indexu lomu), které bylo vloženo mezi spoj SMF–NARF. Jeho velikost pláště byla $125\ \mu\text{m}$ s jádrem $50\ \mu\text{m}$. Cílem spoje SMF–GRIN–NARF bylo snížení rozdílného parametru MFD. Skrze jádro GRIN vlákna se šíří vidy ve tvaru paraboly a principem této metody bylo nalézt optimální délku, ve které vlákno vykazuje ideálně největší pole vidů (MFD). Postupně byla tedy testována různá délka GRIN vlákna a pomocí metody OTDR byl stanoven zpětný rozptyl spoje. Princip této metody byl zobrazen na obrázku 6.11, kde byl také znázorněn průběh vidů skrze GRIN vlákno. Kromě klasického zalomení bylo také vyzkoušeno zalomení pod úhlem na přechodu z jednovidového vlákna na mnohavidové. Z výsledků bylo patrné zlepšení zpětného rozptylu a zároveň byla tato spojovací metoda nejefektivnější.



Obr. 6.11: Princip svářecí metody a vidů skrze GRIN vlákno

Index sváru [-]	Délka GRIN vlákna [mm]	Útlum [dB]	Zpětný rozptyl [dB]	Úhel zalomení [°]
1	1	13,10	-32,3	0
2	1,2	15,05	-29,9	0
3	1,3	17,48	-36,5	0
4	1,4	19,32	-30,2	0
5	1,1	16,01	-38,2	1,5
6	1,3	14,94	-32,5	2

Tab. 6.6: Výsledné hodnoty pro spoj SMF–GRIN–NARF

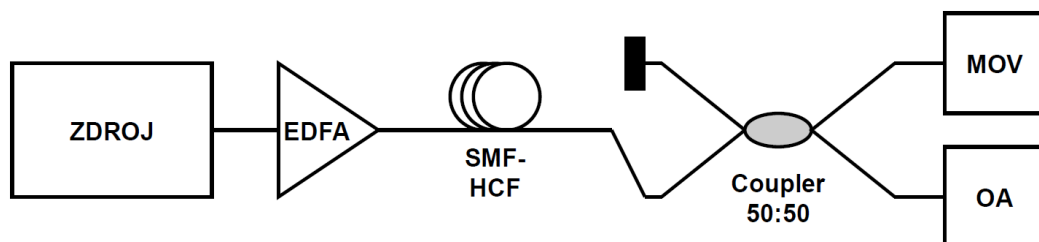
Z výsledků uvedených v tabulce 6.6 bylo patrné, že při této svářecí metodě musí být délka GRIN vlákna zvolena přesně. V teoretickém rozboru byla volena délka od $250 \mu\text{m}$ až po $300 \mu\text{m}$. V našem případě byla délka GRIN vlákna měřena pomocí klasického pravítka a byl tedy problém svár zopakovat. Z toho důvodu byl zpětný rozptyl při sváru pod indexem 6 menší, ačkoliv bylo očekávané zlepšení.

6.7 Alternativní metoda měření útlumu

Pro proměření spoje SMF–HCF byla následně použita sekundární metoda měření a výsledné útlumy byly porovnány s měřením pomocí OTDR. Nejprve bylo tedy proměřeno referenční vlákno, které bylo sestaveno pouze ze dvou SMF pigtailů. Následně byl vytvořen oboustranný svár z SMF–HCF a byl sledován pokles útlumu

na optickém analyzátoru a OTDR. Při vyhodnocení útlumu sekundární metodou bylo využito několika přístrojů:

- Zdroj optického výkonu – Inphenix INL (ipevm 1010)
- Optický zesilovač EDFA
- Optický coupler 50:50
- Přístroj pro měření optického výkonu – Exfo 600 PM
- Optický analyzátor – Yenista OPTICS

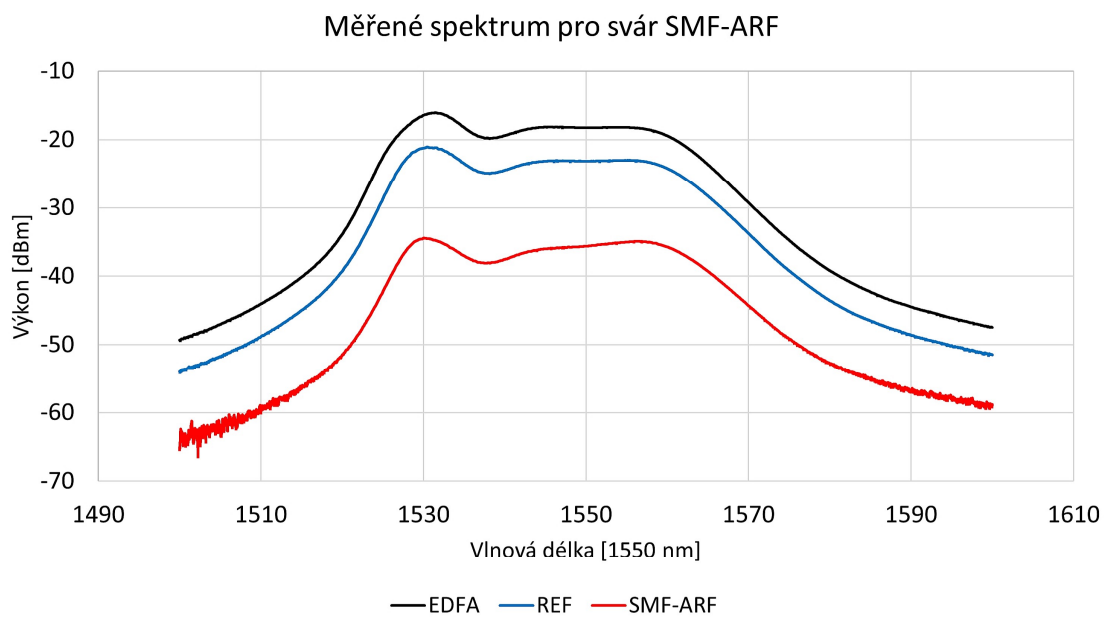


Obr. 6.12: Sekundární metoda měření útlumu

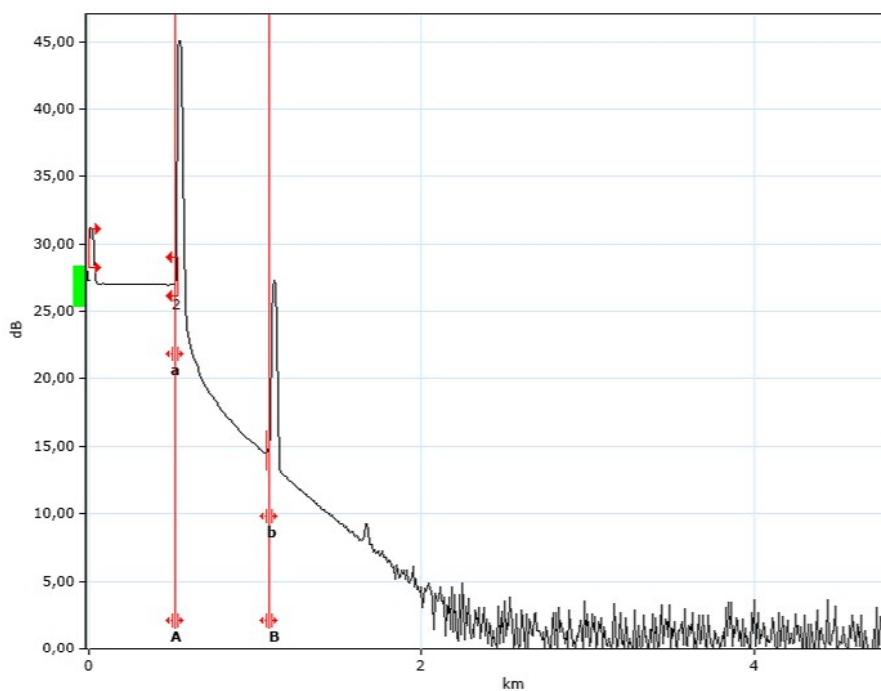
Zdroj byl řízen pomocí proudu, který byl nastaven na 60 mA a následně zesílen pomocí optického zesilovače (EDFA). Signál byl zaveden do optického vlákna, na kterém byl realizován svár typu SMF–HCF. Za pomoci optického děliče (coupler) pokračoval signál do přístroje pro měření optického výkonu (MOV) a optického spektrálního analyzátoru (OA). V druhém měření byl za optické vlákno vložen filtr pro vlnovou délku $1550 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$. Vláknem měřeno metodou zpětného rozptylu vykazovalo útlum 7,58 dB. V následujícím kroku bylo z měření vynecháno vlákno SMF (2 km) a svár byl znovu proměřen, viz 6.14. V takovém případě metoda OTDR (v tabulce pod OTDR2) vyhodnotila útlum 11,99 dB. Zde bylo opět možné pozorovat sjednocení několika událostí do jedné. Výsledné měření sekundární metody bez použití filtru je zobrazeno na obrázku 6.13, kde bylo proměřeno širší spektrum. Výsledný útlum bez vyfiltrování vlnové délky byl stanoven na 12,49 dB. Vyfiltrováním vlnové délky 1490 – 1510 nm byl získán útlum 10,247 dB. Stejným způsobem byl proměřen i druhý typ vlákna (NARF) a výsledné hodnoty byly vloženy do přehledné tabulky 6.7. Měření útlumu s filtrem bylo v tabulce vyznačeno jako OA–F a MOV–F.

Typ spoje [-]	Útlum OTDR [dB]	Útlum ODTR2 [dB]	Útlum OA [dB]	Útlum OA–F [dB]	Útlum MOV [dB]	Útlum MOV–F [dB]
SMF-ARF	7,58	11,99	12,49	10,25	12,81	10,41
SMF-NARF	12,20	13,42	16,13	15,72	16,26	15,80

Tab. 6.7: Výsledná hodnota útlumu dvě různá dutá vlákna



Obr. 6.13: Měření útlumu pomocí spektrálního analyzátoru



Obr. 6.14: Měření útlumu SMF-ARF pomocí OTDR

7 Výsledný souhrn práce

V následující tabulce byly shrnuty veškeré nastavované hodnoty různých parametrů pro obě použitá dutá vlákna. Tyto hodnoty byly použity pro finální sváry, se kterými bylo následně provedeno měření. Při mechanické kontrole svářecího automatu bylo občas pozorováno rozpojení. V takovém případě byla zvýšena hodnota výkonu pro hlavní výboj.

Výsledný svářecí profil pro ARF			
Výkon před svárem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu m/s$]
-125 bit	50	10	0,1
Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L / R [°]
-40 bit	2200	R-30	1,3 / 0,9
Výsledný svářecí profil pro NARF			
Výkon před svárem [ms]	Čas před. výkonu [ms]	Přesah [μm]	Rychlost podávání [$\mu m/s$]
-110 bit	45	10	0,1
Hlavní výboj [std]	Čas hl. výboje [ms]	Pozice výboje [-]	Zalomení vlákna L / R [°]
-30 bit	2300	R-25	1,3 / 0,9

Tab. 7.1: Sestavené svářecí profily pro dutá vlákna

V další tabulce 7.2 bylo uvedeno několik měřených útlumů pro obě vlákna a různé měřící metody. Hodnoty útlumů byly stanoveny pro celý spoj, kde byly provedeny dva sváry typu SMF–HCF. Pro výslednou hodnotu útlumu na jednom sváru byla finální hodnota stanovena jako polovina útlumu z celého spoje. Hodnoty měřené alternativní metodou byly zapsány v intervalu od minimálního měřeného útlumu až po maximální. Podrobněji byly zapsány do tabulky v 6.7.

Výsledná tabulka útlumů jednotlivých měření			
Index měření [-]	Typ spoje	Způsob měření	Výsledný útlum [dB]
1	SMF–ARF	Přímá metoda	3,46
2	SMF–ARF	OTDR	3,79
3	SMF–ARF	OTDR2	5,60
4	SMF–ARF	Alternativní	5,13 – 6,41
5	SMF–NARF	OTDR2	6,71
6	SMF–NARF	Alternativní	7,86 – 8,13

Tab. 7.2: Výsledná tabulka finálních měření

Jako nejlepší metoda pro snížení zpětného rozptylu byla vyhodnocena metoda spojení za pomoci vlákna GRIN (tabulka 6.6). V tomto případě se nám povedlo dosáhnout zpětného rozptylu -38,2 dB při útlumu 16,01 dB. Tato metoda byla na realizaci asi nejjednodušší, až na přesné zalomení pro požadovanou délku GRIN vlákna.

Při metodě, kdy byla vlákna zalomená pod úhlem byl evidován nejlepší zpětný rozptyl -34,4 dB pro úhel zalomení 10°. Metoda byla vyhodnocena jako nejobtížnější a zároveň docházelo ke zvýšení útlumu při rostoucím úhlu zalomení. Také často docházelo k deformaci struktury dutého optického vlákna při překročení úhlu zalomení 5°. Veškeré hodnoty byly shrnuty do přehledné tabulky 6.4.

Metoda zúženého vlákna byla vyhodnocena jako méně spolehlivá (tabulka 6.9). Hodnoty zpětného rozptylu byly sníženy, nicméně obvykle byly doprovázeny vyšším útlumem. Ten byl způsoben nechtěným zúžením dutého optického vlákna v místě sváru. Deformaci bylo zabráněno snížením výkonu hlavního výboje a také posunutím výboje. V takovém případě vykazoval svár hroší mechanické vlastnosti.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo realizovat svár jednovidového vlákna s dutým pomocí svářecího automatu Fujikura FSM-100P. Na úplném začátku bylo tedy potřeba pochopit funkčnost svářecího automatu a vyzkoušet si jeho rozšířené možnosti.

Z pohledu ceny a dostupné délky dutého vlákna nebylo vhodné provádět svár rovnou s tímto vláknem. Veškeré testovací sváry byly tedy nejprve provedeny při spojení jednovidového vlákna s mnohavidovým, přičemž došlo k sestavení svářecího profilu pro tento spoj a následně byl také proměřen.

Po získání určitých zkušeností bylo přistoupeno ke spojení jednovidového vlákna s dutým (SMF-HCF), které bylo založeno na principu antirezonance. První svár vycházel ze svářecího procesu pro jednovidová vlákna a postupnými kroky byl upravován. V průběhu sestavování svářecího profilu byla pozorována značná destrukce struktury dutého vlákna, která byla způsobena nadměrným výkonem výboje a vedla k nárůstu útlumu. V práci jsou proto uvedeny veškeré kroky, které směřovaly k minimalizaci tohoto útlumu. Výsledný svár byl následně porovnán s referenčním dutým vláknem, které bylo svařeno již v laboratoři UFE v Praze. Výsledné útlumy jednoho sváru byly stanoveny pomocí alternativní metody a pohybovaly se v rozmezí 5,13 – 6,41 dB pro první vlákno označováno jako ARF. Spoj SMF-NARF vykazoval útlumy v rozmezí 7,86 – 8,13 dB. U tohoto spoje byl vyšší útlum dán větším parametrem MFD.

V předešlé části byl tedy sestaven svářecí profil pro spojení SMF-HCF a následně bylo vyzkoušeno několik metod pro snížení zpětného rozptylu. Metody pro snížení zpětného rozptylu byly rozebrány v teoretické části a následně z nich bylo vycházeno. Nejprve byla ověřena metoda sváření vlákna pod různým úhlem zalomení, kdy se potvrdilo snížení zpětného rozptylu a zároveň růst útlumu s rostoucím úhlem zalomení. Z časového pohledu byla metoda náročná, protože s rostoucím úhlem docházelo k nepřesnému zalomení dutého optického vlákna. Druhou metodou bylo zúžení vlákna, které bylo provedeno na obou typech vlákna. Zúžení dutého vlákna se ukázalo jako velmi nepraktický krok, jelikož došlo ke zhoršení přenosových vlastností. Dle teoretických poznatků mělo dojít ke zúžení vlákna tak, aby mohlo být zasunuto do jádra dutého vlákna. Takový spoj má být fixován lepidlem. Tento princip byl limitován svářecím automatem, který nedokázal provést zúžení na požadovanou velikost. V našem případě byl proveden svár, u kterého bylo sledováno zlepšení zpětného rozptylu a zároveň byl také vykoupěn vyšším útlumem. V poslední části bylo vyzkoušeno spojení jednovidového s dutým vláknem skrze gradientní mnohavidové vlákno. Tento pokus byl následně vyhodnocen jako nejlepší metoda pro snížení zpětného rozptylu.

Poslední část byla věnována přesnému vyhodnocení útlumu na zmíněném spoji. Veškerá měření byla provedena pomocí metody OTDR a přímé metody, kde bylo

evidováno snížení útlumu v závislosti na změně hodnot parametrů svářecího automatu. Pro přesné měření na krátkém vlákně nebyla vhodná ani jedna z metod. Při použití OTDR docházelo ke sjednocení několika událostí do jedné. Dle doporučení a teoretického rozboru byla zvolena přesnější metoda měření našeho finálního spoje. Vláknem bylo tedy proměřeno několika způsoby a následně byly výsledky porovnány. Jako nejlepší metoda pro spojení jednovidového vlákna s dutým byla metoda s vloženým GRIN vláknem.

Literatura

- [1] BOHÁČ, Leoš. *Optické sítě*. Online. 1. Technická 2, Praha 6: České vysoké učení technické v Praze, 2015. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12633121-Opticke-site-leos-bohac.html>. [cit. 2023-09-24].
- [2] BUBNÍK, Ing. Lukáš; KLAJBL, Ing. Jiří a MAZUCH, Ing. Petr. *Optoelektrotechnika*. Online. 1. Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>. [cit. 2023-11-23].
- [3] FILKA, CSC., prof. ing. Miloslav. *Přenosová media*. Online. 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7. Dostupné z: <https://optolab.utko.fekt.vut.cz/ke-stazeni-2/bprm/>. [cit. 2023-09-27].
- [4] SÝKORA, J. *Typy a vlastnosti optických vláken*. Online. In: cvutfel. 2004. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072802>. [cit. 2023-10-15].
- [5] KRÁLOVÁ, Mgr. Magda. *Optická vlákna*. Online. In: Techmania. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/uplno-odraz-svetla/opticka-vlakna>. [cit. 2023-09-24].
- [6] *Výroba optického vlákna*. Online. In: ELUC. 2016. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/827>. [cit. 2023-11-13].
- [7] *Fiber Optic Transmission Multiplexing Techniques*. Online. In: FS Community. 2009. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/fiber-optic-transmission-multiplexing-technique.html>. [cit. 2023-11-05].
- [8] *CWDM and DWDM explained*. Online. In: Smartoptics. 2022. Dostupné z: <https://smartoptics.com/knowledgebank-post/cw-dw-dm-explained/>. [cit. 2023-11-05].
- [9] *Space Division Multiplexing (SDM) enables extremely high capacity networks*. Online. In: Prysmiangroup. 2023. Dostupné z: <https://www.prysmiangroup.com/en/insight/telecoms/nexst/space-division-multiplexing-sdm-enables-extremely-high-capacity-networks>. [cit. 2023-11-05].
- [10] *Dense Space Division Multiplexing (DSDM) Long Distance Optical Fiber Transmission Technology*. Online. In: NTT Technical Review. 2023. Dostupné z: <https://www.ntt-review.jp/archiv/ntttechnical.php?contents=ntr201706fa2.html>. [cit. 2023-11-05].

- [11] *Why few-mode fibres? Online. In: Modular Photonics.* 2019. Dostupné z: https://www.modularphotonics.com/resources_fibretypes/. [cit. 2023-10-15].
- [12] KOMANEC, M.; DOUSEK, D.; SUSLOV, D. a ZVANOVE, S. *Hollow-Core Optical Fibers. Online.* Radioengineering. 2020, roč. 29, č. 3, s. 417-430. ISSN 1210-2512. Dostupné z: <https://doi.org/10.13164/re.2020.0417>. [cit. 2023-10-15].
- [13] *Optical Fiber Loss and Attenuation. Online.* In: Fiberoptics4sale. 2023. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048006-optical-fiber-loss-and-attenuation>. [cit. 2023-11-23].
- [14] BOYD, Robert W. *Nonlinear Optics.* Online. Třetí. Elsevier, 2008. ISBN 978-0-080-48596-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpN0E00004/toc>. [cit. 2023-10-31].
- [15] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. *Self-phase Modulation.* Online. In: Rp-photonics. 2004. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/self_phase_modulation.html. [cit. 2023-10-31].
- [16] *Nonlinear Effect. Online.* In: Huawei. Dostupné z: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/21_nonlinear.html. [cit. 2023-10-31].
- [17] *Microsoft acquires Lumenisity®, an innovator in hollow core fiber (HCF) cable.* Online. In: Microsoft. 2022. Dostupné z: <https://blogs.microsoft.com/blog/2022/12/09/microsoft-acquires-lumenisity-an-innovator-in-hollow-core-fiber-hcf-cable/>. [cit. 2023-09-11].
- [18] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic communication systems.* 5. Wiley, 2021. ISBN ISBN 9781119737377.
- [19] PENG, Gang-Ding. *Handbook of Optical Fibers.* 1. Springer, 2019. ISBN 978-981-10-7085-3.
- [20] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. *Few-mode Fibers.* Online. In: RP Photonics Encyclopedia. 2004. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/few_mode_fibers.html. [cit. 2023-11-15].
- [21] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. *Hollow-core Fibers.* Online. RP Photonics Encyclopedia. 2004. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/hollow_core_fibers.html. [cit. 2023-09-10].

- [22] JAWORSKI, Piotr. *A Review of Antiresonant Hollow-Core Fiber-Assisted Spectroscopy of Gases*. Online. In: Mdpi. 2021. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5640>. [cit. 2023-10-21].
- [23] ALEXIS MENDEZ, T. F. Morse / Alexis Mendez. *Specialty Optical Fibers Handbook*. 1. San Diego: Elsevier, 2007. ISBN 9780123694065. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369406-5.X5000-0>.
- [24] WEI, Chengli; WEIBLEN, R. Joseph; MENYUK, Curtis R. a HU, Jonathan. *Negative curvature fibers*. Online. In: MENYUK, Curtis R. a HU, Jonathan. Umbc. 2017. Dostupné z: <https://www2.umbc.edu/physics/publications/PdfPapers/PAJ280.pdf>. [cit. 2023-10-22].
- [25] POLI, Federica; CUCINOTTA, Annamaria a SELLERI, Stefano. *Photonic Crystal Fibers*. Online. 1. Springer Dordrecht, 2007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6326-8>. [cit. 2023-10-28].
- [26] RUSSELL, Philip. *Photonic Crystal Fibers : A Historical Account*. Online. In: Semantic scholar. 2006. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16246649>. [cit. 2023-09-14].
- [27] POLETTI, Francesco; PETROVICH, Marco N. a RICHARDSON, David J. *Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications*. Online. 1. Nanophotonics, 2013. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2013-0042/html#Vancouver>. [cit. 2023-10-28].
- [28] JASON, Gregory T.; HAYES, John R.; WHEELER, Natalie V.; CHEN, Yong; BRADLEY, Thomas D. et al. *Fabrication of tubular anti-resonant hollow core fibers: modelling, draw dynamics and process optimization*. Online. In: Optics Express. Optica publishing group. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OE.27.020567>. [cit. 2023-11-18].
- [29] ZHANG, Hao; CHANG, Yanjie; XU, Yantao; LIU, Chengzhen; XIAO, Xusheng et al. *Design and fabrication of a chalcogenide hollow-core anti-resonant fiber for mid-infrared applications*. Online. In: Optics Express. Optica publishing group. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OE.482941>. [cit. 2023-11-18].
- [30] BELARDI, Walter. *Hollow Core Optical Fibers*. 1. MPDI, 2019. ISBN 978-3-03921-089-3.
- [31] *PC vs UPC vs APC Connector: Selecting the Right Fiber Connector Type*. In: FS community [online]. [cit. 2023-11-20]. Dostupné z:

- <https://community.fs.com/article/pc-vs-upc-vs-apc-connector-selecting-the-right-fiber-connector-type.html>
- [32] *Jaký je rozdíl mezi konektorem UPC a APC?* Online. In: FOCC Fiber Optic CO. Dostupné z: <https://cz.opticalpatchcable.com/news/what-s-the-difference-between-upc-and-apc-conn-25321561.html>. [cit. 2023-11-20].
- [33] *How Many Fiber Connector Types Do You Know?* Online. In: FS community. 2009. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/four-types-connectors-of-fiber-optic-patch-cable.html>. [cit. 2023-11-20].
- [34] *Hollow-Core Photonic Crystal Fibers*. Online. In: Scholarly Community Encyclopedia. 2021. Dostupné z: <https://encyclopedia.pub/entry/7108>. [cit. 2023-09-14].
- [35] LUCKI, Michal. *Optoelektronika, fotonika a senzory*. Publi [online]. [cit. 2023-09-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/235/Cover.html>
- [36] *Měření útlumu trasy*. Online. In: ELUC. 2015. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/838>. [cit. 2023-12-03].
- [37] *Spojování optických vláken*. Online. In: ELUC. 2016. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/828>. [cit. 2023-11-19].
- [38] XIAO, Limin; DEMOKAN, M. S.; JIN, Wei; WANG, Yiping a ZHAO, Chun-Liu. *Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Conventional Single-Mode Fibers: Microhole Collapse Effect*. Online. In: Journal of Lightwave Technology. 2007, s. 3563-3574. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.907787>. [cit. 2023-11-28].
- [39] MIN, Yucheng; FILIPKOWSKI, Adam; STEPNIIEWSKI, Grzegorz; DOBRACKOWSKI, Dominik; ZHOU, Jian et al. *Fusion Splicing of Silica Hollow Core Anti-Resonant Fibers With Polarization Maintaining Fibers*. Online. In: Journal of Lightwave Technology. 2021, s. 3251-3259. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3058888>. [cit. 2023-11-29].
- [40] ZHANG, Cong; FOKOUA, Eric Numkam; FU, Songnian; POLETTI, Francesco; RICHARDSON, David J.; SLAVÍK Radan. *Low loss and back-reflection interconnection between SMF and hollow core fiber by angled fusion splicing*. Online. In: IEEE Xplore. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9891676>. [cit. 2023-11-28].

- [41] PASCHOTTA, R. Tapered Fibers - an encyclopedia article. Online. In: RP Photonics Encyclopedia. RP Photonics, 2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.61835/hmz>. [cit. 2024-03-22].
- [42] HUANG, Wei; CUI, Yulong; LI, Xieqian; ZHOU, Zhiyue; LI, Zhixian et al. Low-loss coupling from single-mode solid-core fibers to anti-resonant hollow-core fibers by fiber tapering technique. Online. In: Optics Express. 2019. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OE.27.037111>. [cit. 2024-03-22].
- [43] POLETTI, Francesco. Hollow Core DNANF Optical Fiber. Online. In: LinkedIn. Dostupné z: https://www.linkedin.com/posts/francesco-poletti-88285426_hcf-opticalcommunications-ofc-activity-7178393033967575041-ffKH/. [cit. 2024-05-17].
- [44] ZHONG, Ailing; FOKOUA, Eric Numkam; DING, Meng; DOUSEK; SUSLOV, Dmytro et al. Online. Journal of Lightwave Technology. 2024, roč. 42, č. 6. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3329738>. [cit. 2024-05-17].
- [45] SLAVÍK, Radan; KOMANEC, Matěj a NUMKAM FOKOUA, Eric. Interconnectivity between effectively single-moded antiresonant hollow core fibres and conventional single-mode fibres. Online. Optical Fiber Technology. 2023, roč. 81. ISSN 10685200. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103541>. [cit. 2024-05-17].

Seznam symbolů a zkratek

SMF	Jednovidové vlákno – Single Mode Fiber
MMF	Vícevidové vlákno – Multi Mode Fiber
FMF	Méněvidové vlákno – Few Mode Fiber
MCF	Vícejádrové – Multi Core Fiber
GRIN	Vícevidové gradientní optické vlákno – Graded-Index Multimode Fibers
HCF	Vlákna s dutým jádrem – Hollow Core Fibers
PCF	Fotonické vlákno – Photonic Crystal Fiber
PBG	Zakázaný pás – Photonic Band Gap
ARF	Vlákna na principu antirezonance – Antiresonant Fiber
ARROW	Antirezonantní odraz optického vlnovodu – Antiresonant reflecting optical waveguide
NANF	Antirezonantní vlákno s vnořenou dutinou – Nested antiresonant nodeless fiber
OTDR	Měřicí metoda útlumu založená na zpětném rozptylu – Optical Time Domain Reflectometry
WDM	Vlnový multiplex – Wavelength-Division Multiplexing
OTDM	Časové dělení optického prostoru – Optical Time-Division Multiplexing
SDM	Prosotrové dělení – Space Division Multiplexing
DSDM	Husté prosotrové dělení – Dense Space Division Multiplexing
MFD	Průměr vidového pole – Mode Field Diameter
OM	Optické vícevidové vlákno – Optical Multimode
MIMO	Více vstupů a více výstupů – Multiple-Input Multiple-Output
SHG	Generování frekvence druhého řádu – Second Harmonic Generation
SFG	Generování součtové frekvence – Sum Frequency Generation

SFG	Generování rozdílové frekvence – Difference Frequency Generation
THG	Generování frekvence třetího řádu – Third Harmonic Generation
SPM	Vlastní fázová modulace – Self-Phase Modulation
FWM	Čtyřvlnné směšování – Four-wave mixing