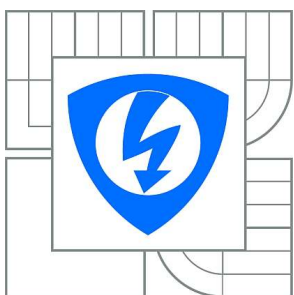


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MIKROSTRUKTURNÍ OPTICKÁ VLÁKNA S DUTÝM JÁDREM

HOLLOW CORE PHOTONIC CRYSTAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

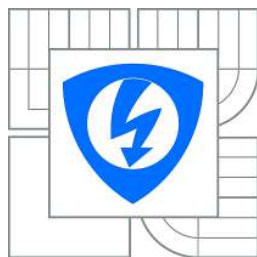
Bc. VÁCLAV HLAVATÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BŘETISLAV MIKEL, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Václav Hlavatý

ID: 125443

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Mikrostrukturální optická vlákna s dutým jádrem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte a srovnajte výhody a nevýhody struktur mikrostrukturálních optických vláken s dutým jádrem. Zaměřte se na vlastnosti vláken, které jsou důležité pro jejich využití při frekvenční stabilizaci laserů, kdy jsou vlákna naplněna absorpčním plynem. Připravte metody spojování těchto vláken se zaměřením na co nejmenší útlum spoje a minimální narušení struktury vlákna a srovnajte je z hlediska možností jejich využití.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího, převážně v angličtině.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

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

Cílem práce bylo studium, návrh a ověření metod pro spojování mikrostrukturálních a standardních jedno nebo více vidových vláken. Hlavní část práce byla zaměřena na metody svařování těchto optických vláken. Při vytváření svařovacího procesu byly testovány metody svařování se změnou polohy obloukového výboje a metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře. Při návrhu parametrů jednotlivých metod, poukázal provedený výzkum na nekompatibilitu svařovacího procesu různých typů vláknových svařeček. Výsledkem práce jsou optimalizované svařovací procesy s použitím obou metod pro svařování vláken HC 1550-2 s vlákny SMF 28.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrostrukturální vlákna, Svařování , Frekvenční stabilizace laserů.

ABSTRACT

Aim of the work was to study, design and verify methods of splicing photonic crystal fibers with standard single-mode and multi-mode fibers. The main goal was to make of the fusion splicer Fujikura FSM 100P splicing process. To create splicing process, various splicing methods were tested. Method of the moving position of the arc discharge from the center of splicing fibers and the method with increased gas pressure in the microstructure were mainly tested. Research revealed the incompatibility of splicing process of the different types of fiber splicers. The main results of the work are optimized methods of the splicing HC 1550-2 fiber and SMF 28 fiber.

KEYWORDS

Photonic crystal fiber, Splice, Frequency-stabilized lasers.

HLAVATÝ, Václav *Mikrostrukturální optická vlákna s dutým jádrem*: semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2014. 67 s. Vedoucí práce byl Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma „Mikrostrukturální optická vlákna s dutým jádrem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu 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.

Vysoké učení technické v brně

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu Semestrálního projektu panu Ing. Břetislavu Mikelovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Vysoké učení technické v brně

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Mikrostrukturní optická vlákna	13
1.1 Fotonický krystal	13
1.1.1 1D Fotonický krystal - Braggovo zrcadlo	13
1.1.2 2D Fotonický krystal - fotonické vlákno	14
1.2 Typy mikrostrukturních optických vláken	17
1.3 Využití mikrostrukturních vláken	18
1.3.1 Mikrostrukturní vlákno jako plynový senzor	18
1.3.2 Mikrostrukturní vlákno v medicíně	18
1.3.3 Stabilizace laserů	19
1.4 Výroba mikrostrukturních vláken	20
1.4.1 Výroba preformy.	20
1.4.2 Tažení vlákna	21
1.4.3 Výrobní princip PCF	22
2 Spojování optických vláken	24
2.1 Rozebíratelné spoje	24
2.2 Nerozebíratelné spoje	25
2.2.1 Spojování PCF	25
2.3 Problémy při svařování PCF-SMF	25
2.3.1 Zhroucení mikrostruktury	26
2.3.2 Rozdílný mode field diametr MFD	26
2.4 Principy svařování SMF a PCF vláken	27
2.4.1 Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje . . .	27
2.4.2 Metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře	28
2.4.3 Metoda vloženého vlákna	28
2.4.4 Metoda řízené deformace mikrostruktury	29

3	Realizace svařovacího procesu	30
3.1	Příprava vláken	32
3.1.1	Stripování vláken	32
3.1.2	Čištění vlákna	33
3.1.3	Lámání vlákna	34
3.2	Svařování PCF-SMF vláken	36
3.2.1	Metoda měření svárů	36
3.2.2	Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje . . .	37
3.2.3	Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje s více výboji	46
3.2.4	Metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře	50
3.2.5	Využití techniky svařování PCF vláken	56
3.3	Vlastní přínos	58
4	Závěr	59
	Literatura	61
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	65
	Seznam příloh	66
A	Obsah přiloženého CD	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Jednodimenzionální fotonický krystal[2].	13
1.2	Dvou dimenzionální fotonický krystal[2].	14
1.3	Znázornění TM a TE vidu ve čtvercové struktuře [2].	15
1.4	Znázornění TM a TE vidu ve mřížkové struktuře [2].	16
1.5	Znázornění TM a TE vidu ve hexagonální struktuře [2].	17
1.6	Základní typy mikrostrukturních vláken a) Braggovo vlákno b) s dutým jádrem c) s pevným jádrem.	18
1.7	Přenosové spektrum acetyleny [6].	19
1.8	Preforma standardního vlákna [7].	20
1.9	Schéma tažné věže pro optická vlákna [9].	21
1.10	Výroba mikrostrukturního vlákna[10].	22
2.1	Standardní konektory pro optická vlákna[12].	24
2.2	Schématické znázornění sestavení vláken před svárem.	28
2.3	Rozdílné principy svařování PCF vláken; a) posunem obloukového výboje z oblasti výboje - minimalizace hroucení mikrostruktury, b) spojení pomocí vloženého vlákna - snížení rozdílu MFD, c) pomocí částečného kolapsu mikrostruktury - snížení rozdílu MFD, d) pomocí tlaku plynu uvnitř PCF - minimalizace kolapsu mikrostruktury. . . .	29
3.1	Svařovací automat Fujikura FSM 100P.	30
3.2	Typické standardní vlákno	32
3.3	Zalomení lámačkou CT 32.	35
3.4	Zalomení lámačkou CT 100.	35
3.5	Schéma měřicího systému.	37
3.6	Vlákna před prvním svárem.	39
3.7	Ukázky realizovaných svárů pro výkon předeřevu $S_P = -200$ bit a hlavního výboje; a) $S_H = -150$ bit, b) $S_H = -100$ bit, c) $S_H = 0$ bit. . .	39
3.8	Testované sváry s parametry $S_P = -50$ bit $S_H = 0$ bit, a) $G = 50 \mu m$ b) $G = 15 \mu m$	40
3.9	Svařovací profil s hlavním výbojem.	40

3.10	Optimalizovaný svařovací profil.	41
3.11	X,Y pohled na typický svár pro $S_1 = -20$ bit a velkou pevnosti spoje parametry z Tab. 3.3.	42
3.12	X,Y pohled na svár, který neprošel testem pevnosti, parametry v Tab. 3.4.	43
3.13	X,Y pohled na svár pro výkon $S_1 = -75$ bit dle parametrů z Tab. 3.5.	44
3.14	Svár výkonem $S_1 = -85$ bit a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, s parametry sváru z Tab. 3.6.	45
3.15	Schéma svařovacího procesu pro metodu s více výboji.	46
3.16	X,Y pohled na svár pro výkon $S_1 = -130$ bit $S_2 = -180$ bit $S_3 = -190$ bit dle parametrů z Tab. 3.7.	48
3.17	X,Y pohled na typický svár pro výkon $S_1 = -130$ bit $S_2 = -190$ bit S_3 $= -210$ bit dle parametrů z Tab. 3.8.	49
3.18	Schéma napojení tlakové nádoby na mikrostrukturu PCF vlákna.	50
3.19	Dočasný konektor BFT1 s koncovkou SMA905 napojený na rozvod stlačeného dusíku.	51
3.20	Typický svár pro $S_1 = -20$ bit a $P = 1,4$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.9.	52
3.21	Typický svár pro $P = 1,7$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.10.	54
3.22	Typický svár pro $P = 1,8$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.11.	55
3.23	Schéma zařízení pro plnění a testování PCF-laserového stabilizátoru.	57

SEZNAM TABULEK

3.1	Nastavitelné parametry pro svařovací proces.	38
3.2	Optimalizované parametry pro FSU-975.	38
3.3	Svařovací parametry pro svár s velkou pevností, Obr. 3.11.	42
3.4	Svařovací parametry pro svár se sníženou pevností, Obr. 3.12.	43
3.5	Svařovací parametry pro svár s nízkou energií výboje, Obr. 3.13.	44
3.6	Svařovací parametry pro svár s minimální pevností spoje na Obr. 3.14.	45
3.7	Svařovací parametry pro svár s nízkými výkony výbojů na Obr. 3.16.	48
3.8	Svařovací parametry pro svár s minimální pevností spoje na Obr. 3.17.	49
3.9	Svařovací parametry pro svár s velkou pevností spoje, Obr. 3.20.	52
3.10	Svařovací parametry pro svár se sníženou pevností spoje, Obr. 3.21.	53
3.11	Svařovací parametry pro svár s nejnižším dosaženým útlumem, Obr. 3.22.	54
3.12	Shrnutí parametrů jednotlivých svárů.	56

ÚVOD

Mikrostrukturální optická vlákna PCF (Photonic Crystal Fiber), jsou v posledních letech stále více využívána v různých oblastech optoelektroniky, zejména pak v oblasti návrhu nových senzorů. Tato vlákna, která byla poprvé vyrobena v devadesátých letech minulého století, se liší od standardních optických vláken zejména svojí strukturou. Struktura PCF vláken je tvořena soustavou mikro dutinek, které vláknům umožňují daleko větší možnost změny základních parametrů. Tato vlákna umožňují lepší řízení polarizace, nebo jsou vhodná např. jako kompenzátory chromatické disperze. Základní rozdělení vláken, které je v této práci využíváno je na PCF vlákna s dutým jádrem a PCF vlákna s pevným jádrem. Práce je zaměřena na přípravu PCF vláken pro plnění různými plyny a jejich využití při frekvenční stabilizaci laserů. PCF vlákna jsou používána v řadě optických zařízení a senzorových aplikacích, kde by bylo obtížné použít konvenční vlákna. Například se používají pro vedení výkonových laserů, jako zesilovací prvek nebo pro právě pro frekvenční stabilizaci laserů. Mají velký potenciál v mnoha aplikacích i do budoucna.

Práce je zaměřena na přípravu PCF vláken, které budou plněny plynem pro frekvenční stabilizaci laserů. Aby bylo možné využít jejich plný potenciál, je nutné tato vlákna efektivně spojovat s konvenčními vlákny především pak jednovodovými SMF (Single-Mode Fiber). Nejčastěji se optická vlákna spojují pomocí optických konektorů (rozebíratelný spoj) nebo se svařují (nerozebíratelný spoj). Pro vlákna plněná plynem je nutné použít svařování. Konektory lze použít pouze za předpokladu, že vlákno PCF bude na obou koncích uzavřeno.

Nejpoužívanější metodou svařování, která je v současnosti využívána je obloukové svařování. Obloukové svářečky jsou levné, poměrně rozšířené a jejich nabídka je velmi široká. Od nejlevnějších jednoúčelových, až po velmi složité, určené pouze pro výzkumné laboratoře, které však umožňují spojovat i PCF vlákna, vytvářet optické čočky na koncích vláken atd. Složitější svářečky umožňují svářet více typů vláken, ale jejich použití je při běžné práci složité. Různé typy svářeček od různých výrobců mají odlišné způsoby nastavení svařovacího procesu. Neexistuje tedy jednotný postup a přesné parametry pro svařování, proto musí být pro každý přístroj optimalizovány.

Protože je svařování stále hlavním problémem, který limituje použití PCF vlákna v konvenčních systémech, je nutné najít levný a spolehlivý postup, jak svařovat různá PCF vlákna mezi sebou nebo se standardními vláknovými systémy.

Tato práce se zabývá návrhem a optimalizací svařovacího procesu pro PCF vlákna na svářecím automatu Fujikura FSM100P.

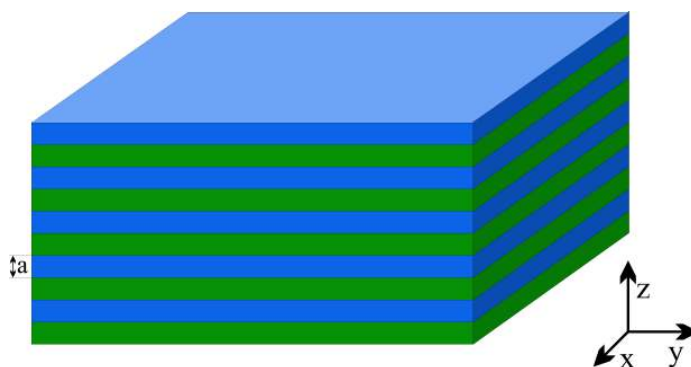
1 MIKROSTRUKTURNÍ OPTICKÁ VLÁKNA

1.1 Fotonický krystal

Prvním vědcem zabývajícím se fotonickými krystaly byl fyzik John W. Rayleigh, který zkoumal periodickou dielektrickou strukturu, ve které se opakovaně mění index lomu. Bylo zjištěno, že při určitém uspořádání těchto struktur je možné zcela potlačit šíření světla pro určité vlnové délky, bez ohledu na směr šíření nebo polarizaci světla. Nejedná se o absorpci, ale periodické uspořádání způsobuje, že ve frekvenčním pásmu není možné šíření v daném směru [1] [2]. Tento jev se nazývá fotonické zakázané pásmo PBG (Photonic Band Gap). Takto uspořádané dielektrické struktury se začaly nazývat fotonické krystaly.

1.1.1 1D Fotonický krystal - Braggovo zrcadlo

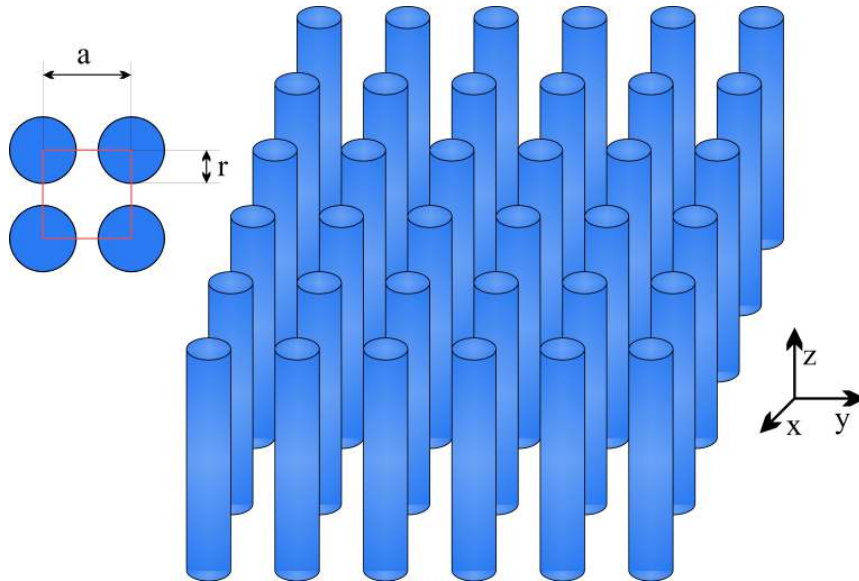
Nejjednodušší zařízení založené na principu fotonického jevu je jednodimenzionální fotonický krystal nazývaný Braggovo zrcadlo. Tento krystal se skládá z vrstev dvou různých dielektrik s různým indexem lomu. Světlo procházející skrz tento krystal se na každém rozhraní odráží. Odražené vlny jsou ve fázi, ale průchozí ne. Tím se prošlé vlny mezi sebou vyruší a uplatňují se pouze odražené vlny. Tyto struktury se konstruují jako půl nebo čtvrt vlnné. Tloušťka vrstev odpovídá polovině nebo čtvrtině vlnové délky světla [1] [2].



Obr. 1.1: Jednodimenzionální fotonický krystal [2].

1.1.2 2D Fotonický krystal - fotonické vlákno

Fotonické krystaly s 2D periodickou orientací je možné popsat jako soustavu tyčí uspořádané do tvaru šachovnice, kde se opět střídají dvě různá dielektrika s různým indexem lomu[1] [2]. Tuto strukturu je možné vytvořit jako soustavu tyčí ve vzduchu nebo vzduchové otvory uvnitř dielektrika. Jedná se o princip, který tvoří základ samotných mikrostrukturních vláken.

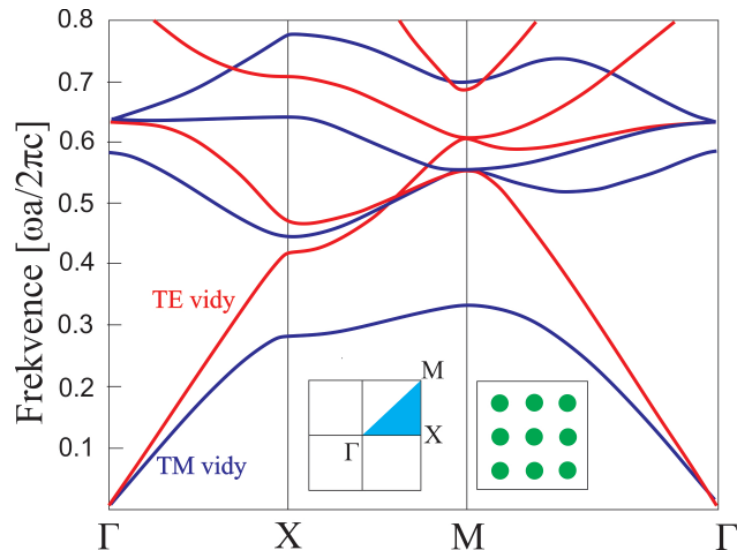


Obr. 1.2: Dvou dimenzionální fotonický krystal[2].

Hlavním jevem využívaným u struktur fotonických krystalů je princip zakázaného pásma PBG (Photonic Band Gap)[1] [2] [3]. Jedná se o rozsah frekvencí, které nemohou vstoupit do krystalu nebo z něj vystoupit. Aby tento jev nastal v dielektriku je nutné upravit jeho strukturu.

Čtvercová struktura

Na Obr. 1.3 je zobrazeno rozdělení TM vidů (Transverzálně Magnetický) a TE vidů (Transverzálně Elektrický) ve čtvercově uspořádané soustavě tyčí. Principy, které umožňují vedení TE vidů nebo TM vidů se liší. Proto v nezákladnějších strukturách nastává princip zakázaného pásma pouze pro jeden stav polarizace.

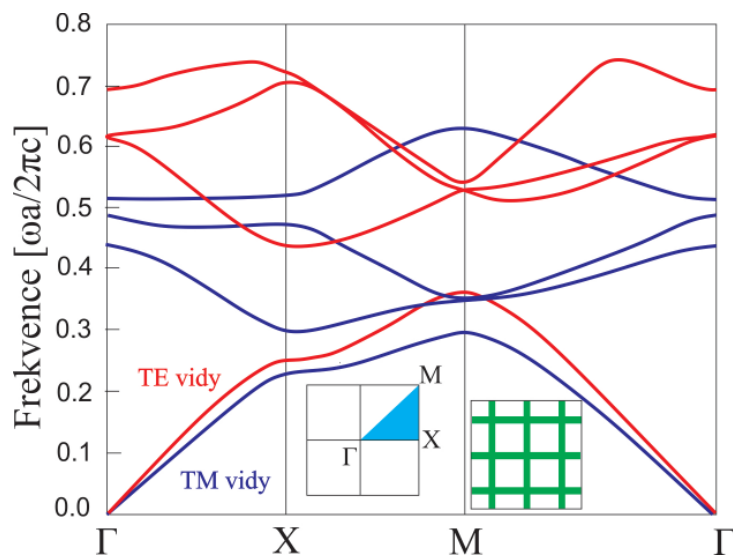


Obr. 1.3: Znázornění TM a TE vidu ve čtvercové struktuře [2].

Struktura čtvercového uspořádání tyčí ovlivňuje zakázané pásmo pouze pro TM vidy a závisí na oblastech s vysokou permitivitou ϵ v dané struktuře [2]. Na Obr.1.3 je patrné vytvoření zakázaného pásma pro TM vidy. TE vidy se protínají a tím způsobují únik energie ze struktury.

Mřížková struktura

Pro strukturu čtvercové mřížky se vytváří zakázané pásmo pro TE vidy, ale ne pro TM vidy. Jedná se o opačný případ čtvercově uspořádaných tyčí viz Obr.1.4. Pro strukturu čtvercových mřížek se vytváří zakázané pásmo u TE vidů na základě

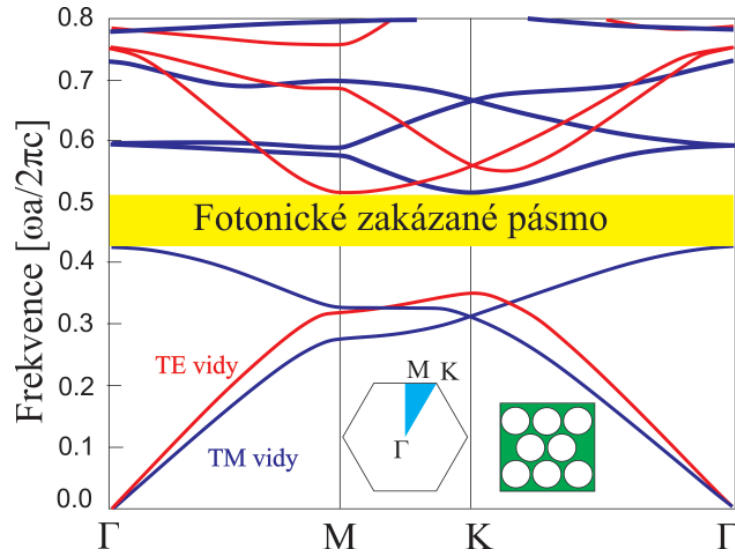


Obr. 1.4: Znázornění TM a TE vidu ve mřížkové struktuře [2].

dobrého propojení jednotlivých bodů mřížky.

Hexagonální struktura

Zkombinováním obou vlastností je možné dosáhnout úplný zakázaný pás pro všechny polarizace. Trojúhelníkové uspořádání vzduchových děr v pevném dielektriku vytvoří zakázané pásmo pro oba vidy. Dostatečně velký poloměr děr vytvoří mezi děrami lokalizované oblasti s vysokou permitivitou pro zakázaný pás TM vidů [1]. Současně vytváří mezera mezi těmito děrami spojenou vrstvou pro zakázaný pás TE vidů viz. Obr. 1.5. Mikrostrukturní optická vlákna s dutým jádrem jsou založena na tomto principu.



Obr. 1.5: Znázornění TM a TE vidu ve hexagonální struktuře [2].

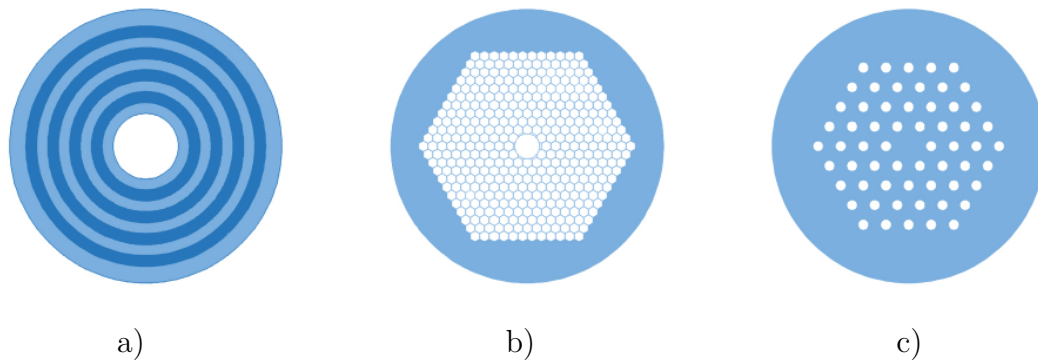
1.2 Typy mikrostrukturálních optických vláken

Mikrostrukturální vlákno (PCF) se dělí na tři základní kategorie, tzv. Braggova vlákna, PCF s dutým jádrem a PCF s pevným jádrem.

Braggova vlákna jsou vytvořena na principu 1D fotonického krystalu, také se nazývají válcová vlákna. Struktura takového vlákna vychází z popisu v kap 1.1. Tato vlákna je možné vytvářet s dutým i pevným jádrem, ale vyznačují se velkými útlumy. Proto je jejich využití omezené.

Další skupinou jsou PCF s pevným a dutým jádrem. Jsou to vlákna vycházející z principu 2D fotonického krystalu. Ve vlákne s dutým jádrem se světlo šíří uvnitř vzduchového jádra, které může být naplněno různými plyny a tím je možné výrazně upravovat vlastnosti vlákna. Uzamčení světla ve vlákne zajišťuje mikrostruktura, která vytváří zakázané pásmo pro určité frekvence.

Poslední nejrozšířenější skupinou jsou PCF s pevným jádrem. Tato vlákna využívají principy step-indexového vedení světla. Mikrostruktura u těchto vláken nevytváří zakázané pásmo jako u HC-PCF, ale snižuje efektivní index lomu pláště. Tím se vytvoří step indexové vedení uvnitř struktury, bez potřeby mít vlákno složeno ze dvou různých dielektrik.



Obr. 1.6: Základní typy mikrostrukturálních vláken a) Braggovo vlákno b) s dutým jádrem c) s pevným jádrem.

1.3 Využití mikrostrukturálních vláken

PCF vlákna se začínají využívat ve velkém množství aplikací. Díky velkému počtu různých typů PCF vláken je možné, využívat tato vlákna od sensorových systémů přes výkonové vedení laserů až po využití medicíně. Nejvíce se dnes uplatňují jako senzor, kterým je možné měření obsahu různých plynů, pro detekci PH nebo uhlovodíkových řetězců.

1.3.1 Mikrostrukturální vlákno jako plynový senzor

Princip plynového senzoru spočívá ve využití vnitřní struktury PCF. Světlo uvnitř vlákna s pevným jádrem se šíří v jádře, ale malá část zasahuje i do oblasti mikrostruktury. Plyn uvnitř mikrostruktury ovlivní procházející světlo (absorbuje část spektra) a tím je možné zjistit koncentraci a typ plynu[4].

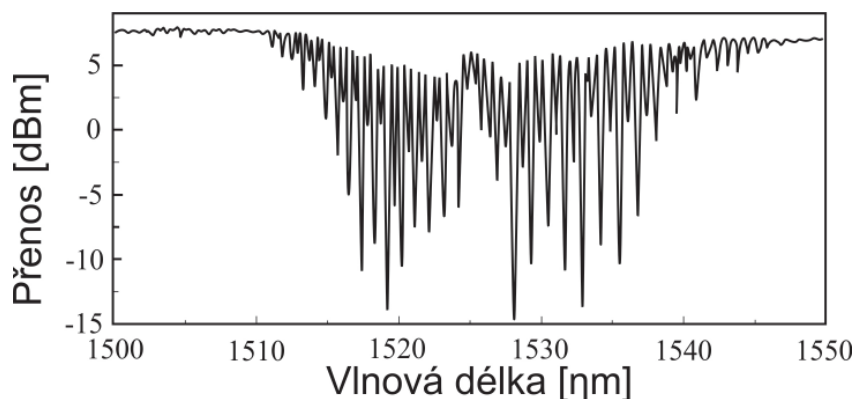
1.3.2 Mikrostrukturální vlákno v medicíně

PCF vlákna se začínají v medicíně využívat stále víc. Existuje několik aplikací, které využívají tato vlákna jako biochemické senzory. Využití těchto nových technologií je stále v testování, ale dnes je za pomoci PCF vláken možné detekovat molekuly DNA nebo proteinů [5]. Dále se PCF vlákna používají pro mikrooperace s použitím

vysoce výkonných laseru, které by nebylo možné vést přes standardní optická vlákna nebo pro optickou biopsii rakovinotvorných buněk.

1.3.3 Stabilizace laserů

Pro frekvenční stabilizaci laserů se v současnosti využívá mnoho technik. Jednou z nich je stabilizace laserové frekvence na absorpční čáru odpovídajícího plynu. Dnes se používají pro stabilizaci absorpční kyvety naplněné jódem, pro viditelné spektrum nebo acetylenem pro infračervené spektrum využívané telekomunikacích viz Obr.1.7. Vytvoření přesné kyvety je velice nákladná záležitost a výsledná kyveta může dosahovat délky až 1 m [4][6]. Stabilizační systém je příliš křehký a velký. Proto se v mnoha aplikacích nedá využít.

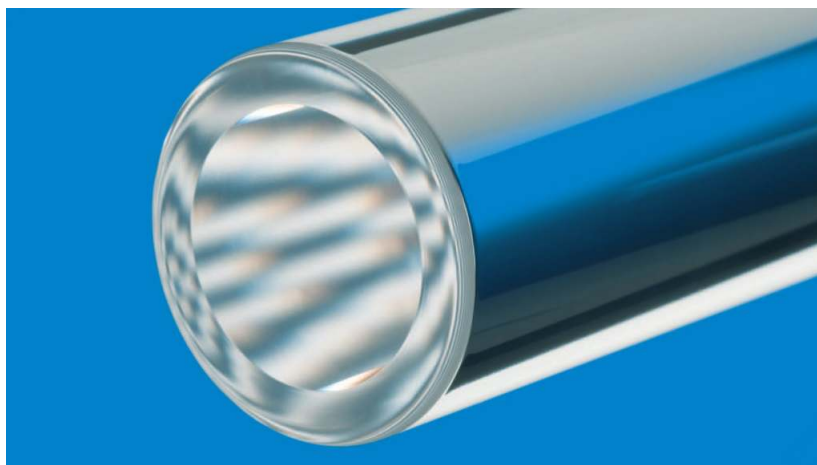


Obr. 1.7: Přenosové spektrum acetylenu [6].

Ke změně došlo až při použití HC-PCF vláken, která můžeme plnit požadovanými plyny. Tím se dá použít samotné optické vlákno jako aktivní prvek a zároveň se docílí miniaturizace celého systému.

1.4 Výroba mikrostrukturních vláken

Výroba každého vlákna se skládá ze dvou základních procesů: Výroba preformy a tažení vlákna. Výroba preformy spočívá ve vytvoření skleněného válce o průměru několik cm se stejnou strukturou jako budoucí vlákno. Tato preforma může mít délku i několik metrů. V dnešní době se využívá více technologií, jak preformu vyrobit.



Obr. 1.8: Preforma standardního vlákna [7].

1.4.1 Výroba preformy.

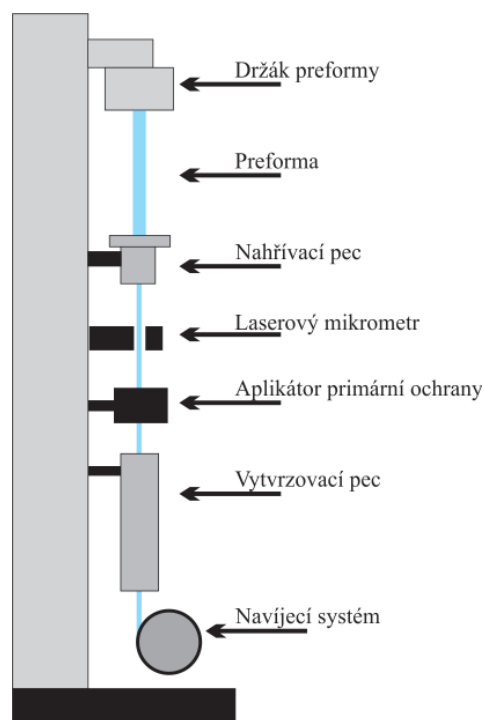
OVPO technologie (Outside Vapour Phase Oxidation)

Princip OVPO technologie spočívá v nanášení vrstev pomocí hořáku, kde se mísí SiCl_4 s O_2 . Výsledné sklo dopadá na otáčející se preformu a přitom vytváří rovnoměrné vrstvy. Vytvořená preforma se vloží do smršťovací pece a sklovina tak dostane své konečné vlastnosti. Ve svých začátcích měla vlákna z preformy vyráběná touto metodou útlum přes 20 dB/km. Dnes už poskytuje útlumy kolem 0,25 dB/km [8].

MCVD technologie (Modified Chemical Vapour Deposition)

Touto technologií se vytvářejí velmi kvalitní vlákna. jedná se o chemickou depozici skelné plynné fáze uvnitř skleněné trubky. Po depozici par je nutné preformu smrštit

ve smršťovací peci. Díky této technologii je možné vytvořit preformu, ze které se vytáhne až 50 km vlákna.



Obr. 1.9: Schéma tažné věže pro optická vlákna [9].

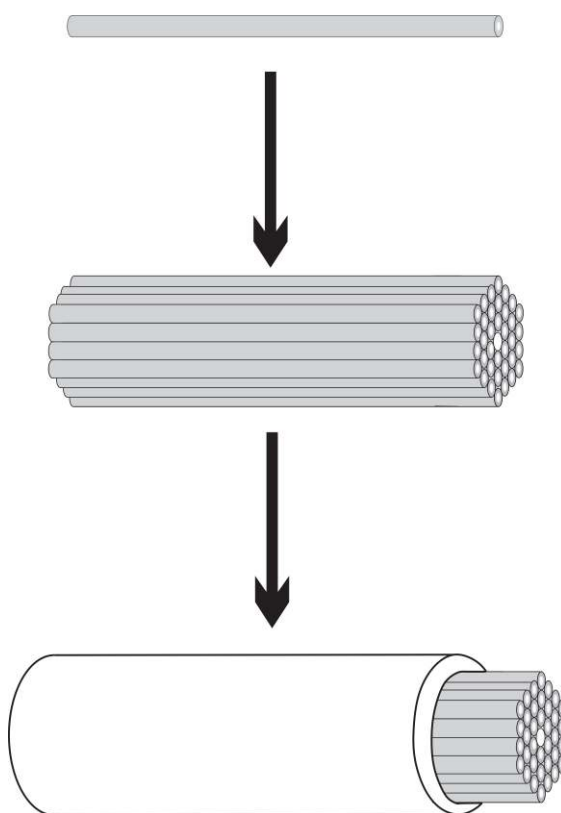
1.4.2 Tažení vlákna

Vytvořená preforma se upne na vrcholku tažné věže a začne se pomalu vsouvat do pece. Uvnitř pece se skelný materiál nahřeje na teplotu, kdy se změní viskozita a natavený materiál vytvoří kapku, která pozvolna propadne celým systémem. Skleněná kapka se uštípne a tenké vlákno se upne do navíjecího mechanismu. Po upnutí je třeba okamžitě začít s tažením vlákna, aby se vlákno v peci nepřehřálo a nepřetrhlo. První metry vlákna nemají potřebné parametry a souží jako upnutí na navíjecí systém. Dosažení správného průměru zajišťuje laserový mikrometr, který snímá průměr vlákna. V případě potřeby počítačový systém upraví teplotu nebo rychlostí navíjení. Před samotným navinutím na cívku je vlákno pokryto jedním nebo dvěma vrstvami primární akrylové nebo polyimidové izolace [9]. [10] [11]

Tažením se docílí tenkého rovnoměrného vlákna. Optické vlákno je taženo na průměr $125\ \mu\text{m}$ a proto jsou kladeny velké nároky na přesnost mechanických částí tažné věže. Rychlost tažení vláken je 200 - 2000 metrů za minutu [8].

1.4.3 Výrobní princip PCF

Výroba preformy pro PCF je složitý a nákladný proces. Preformu PCF vláken je možné vytvářet několika způsoby. U nejjednodušších vláken se preforma skládá z desítek skleněných trubiček a velké skleněné objímky viz. Obr. 1.10.



Obr. 1.10: Výroba mikrostrukturního vlákna[10].

Spojení kapilár

První metoda, která byla objevena po řadě neúspěšných pokusů, byla metoda spojení skelných kapilár. Jedná se o metodu, kdy je několik skleněných kapilár svařeno k sobě do podoby preformy a poté jsou dohromady taženy jako klasické vlákno. Tato

procedura je univerzální a dovoluje vytvářet mnoho typů vláken s přesnými rozměry i různými tvary vnitřní mikrostruktury. Metodou je možné vytvořit děrování v plášti s průměry 25 nm [3][10].

Metoda vytlačování

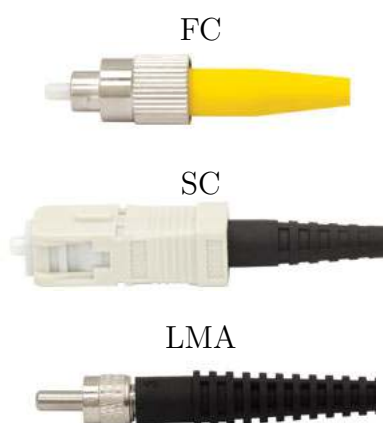
Metoda spočívá v tlačení roztaveného skla přes děrovanou matici. Při vytlačování může být vlákno rovnou taženo. Vytlačováním je možné vytvářet krystalové nebo amorfní struktury, polymerní vlákna a směsná skla. Pomocí této metody je možné i selektivní dopování specifického regionu [3].

2 SPOJOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

Spojování optických vláken je možné rozdělit na rozebíratelné a nerozebíratelné. Oba principy spojování se používají u standardních spojů, záleží pouze na potřebách pro daný spoj.

2.1 Rozebíratelné spoje

Mezi rozebíratelné spoje patří například konektorové spojky nebo gelové násuvné spojky. Výhoda těchto spojů spočívá v jejich univerzálnosti. Spoje je možné opětovně rozdělit nebo vyměnit za jiné. Tyto spoje mají ale také nevýhody. Největší nevýhodou je zvýšený útlum spoje. Útlum spoje je u konektorů způsoben několika problémy. Prvním je rozptyl na rozhraní vlákno-vzduch-vlákno, kde dochází ke zpětným odrazům a také k odrazu mimo jádro vlákna. Pro potlačení těchto vlivů byly vyvinuty konektory typu APC (Angled Physical Contact), které díky zbrošení do úhlu méně odrážejí světlo zpět ke zdroji. Druhým je sousost vláken uvnitř konektorové spojky, kde je přesná výroba velice důležitá. Posledním problémem jsou nečistoty. Jakákoliv nečistota mezi vlákny způsobí útlum. Zrnko prachu o velikosti $1\ \mu\text{m}$ způsobí útlum, ale může také ovlivnit sousost i odraz mezi prostředími.



Obr. 2.1: Standardní konektory pro optická vlákna[12].

2.2 Nerozebíratelné spoje

U nerozebíratelných spojů se dnes používá nejvíce svařování, ale existují i jiné metody, jako například lepení nebo mechanické spojky. Hlavní výhodou svařování je mechanická pevnost a velmi nízké útlumy. Nevýhodou je pak cena vybavení a nerozebíratelnost spoje.

2.2.1 Spojování PCF

Vlákna PCF se spojují jako standardní SMF a MMF (Multi Mode fiber) vlákna různými konektory. Výjimkou jsou metody využívající gelové spojky nebo lepení. Tyto spojovací systémy nejsou vhodné pro PCF vlákna. Důvodem jsou problémy se zatečením média do mikrostruktury a tím zhoršení útlumu spoje.

Svařování, jako další metoda možného spojování, má velký vliv na mikrostrukturu. Nahřátí vlákna jako při konvenčním svařování, způsobí kolaps mikrostruktury a tím zásadní zvýšení útlumu na spoji. Při některých aplikacích, jako je stabilizace laserů se PCF plní různými plyny pod specifickým tlakem. V takovém případě není možné využít konektory. Jediným univerzálním způsobem je svařování. Proto je nutné vytvořit speciální metody jak tato vlákna svařovat. Z tohoto důvodu se práce zabývá vytvořením speciálních svařovacích postupů pro vlákno HC 1550-2 které svými vlastnostmi odpovídá plánovanému využití.

2.3 Problémy při svařování PCF-SMF

Nejčastěji se PCF vlákna spojují k jiným standardním vláknům, aby je bylo možné připojit do stávajících optických systémů. Jedním z hlavních parametrů, které ovlivňují útlum spoje je rozdílný MFD mezi spojovanými vlákny. Druhým je kolaps mikrostruktury při svařovacím procesu, které zásadně zesílí útlum na spoji (zničením struktury uzamykající světlo u PCF).

2.3.1 Zhroucení mikrostruktury

PCF vlákno může mít mnoho různých struktur a tím i rozdílné vlastnosti. Jedním z hlavních problémů při svařování je kolaps mikrostruktury z důvodu přehřátí vlákna. Řešení pro jeden druh PCF vlákna není vhodný pro jiný typ vlákna [13].

Když svařujeme konvenční vlákna, oba konce vláken jsou nahřáty až do změkčení skleněné hmoty a poté stlačeny k sobě, aby se slily a vytvořily pevný spoj. Pokud takto zahřejeme PCF vlákno a viskozita skla poklesne pod určitou úroveň, přitažlivé síly převládnu a mikrostruktura se začne bortit. Energie potřebná k změkčení je u PCF vláken nižší než u SMF. Důvodem je menší střední průměr pevného skleněného materiálu než u SMF. Bude-li pohlcování tepla shodné pro PCF i SMF je jejich kolaps dán vztahem:

$$V_{kolaps} = \frac{\gamma}{2\mu}, \quad (2.1)$$

kde γ je napětí povrchu a μ je viskozita.

Program pro SMF vlákna dodá do sváru celkovou energii natolik velkou, že u PCF dojde k úplnému kolaps mikrostruktury v oblasti až do vzdálenosti $600 \mu m$ od středu výboje. V závislosti na typu vlákna dochází k útlumu na spoji 10-25 dB, a proto je potřeba minimalizovat kolaps této mikrostruktury PCF [14].

2.3.2 Rozdílný mode field diametr MFD

Rozdělení světelné intenzity v průřezu vlákna se nazývá MFD (Mode field diametr). Část výkonu se šíří pláštěm, proto je MFD větší než jádro vlákna. Pokud spojujeme dvě vlákna k sobě s rozdílnými MFD, ve směru z většího MFD do menšího MFD, dojde k vyzáření části výkonu na spoji. Pak je útlum spoje α mezi PCF a SMF při optimální sousosti vyjádřen:

$$A = -20 \log \left(\frac{2\omega_{PCF}\omega_{SMF}}{\omega_{PCF}^2 + \omega_{SMF}^2} \right), \quad (2.2)$$

kde ω_{PCF} ω_{SMF} jsou MFD daných vláken.

Útlum spoje mezi vlákny SMF a PCF byl experimentálně změřen na vlnové délce 1550 nm a dobře se shodoval s teoreticky spočítaným útlumem, dle vzorce (2.2). Shoda mezi teoretickou a prakticky změřenou hodnotou napovídá, že útlum

na spoji je ovlivněn převážně rozdílným MFD. Podmínkou pro nízko-útlumový spoj je malý rozdíl mezi MFD spojovaných vláken nebo správný směr světelného toku [14] [15] [16] [17].

2.4 Principy svařování SMF a PCF vláken

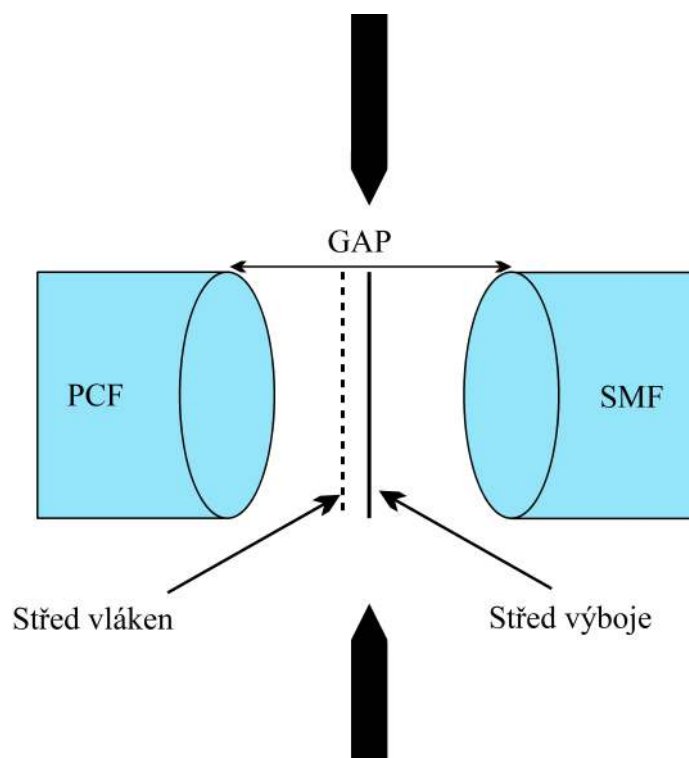
Aby se předešlo kolapsu mikrostruktury při svařování PCF-SMF, musí být oproti procesu pro spoje SMF-SMF upraveny parametry svařovacího procesu. Pro svaření SMF-PCF s požadavkem na malý útlum spoje a s dobrými mechanickými vlastnostmi je možné dosáhnout pomocí:

- velikostí výkonu výboje
- změnou času výboje
- přesahu vláken při spojení
- odsazení vláken při přehřevu

2.4.1 Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje

Aby bylo minimalizováno poškození struktury PCF vlákna jsou třeba při svařování použít slabý výboj a krátký čas výboje. Pokud se sníží pouze výkony výbojů tak, aby nebyla porušena struktura PCF vlákna, nedojde ke spojení. SMF vlákno se nenahřeje na dostatečnou teplotu. Pro optimální svaření je nutné značnou část výkonu oblouku přesunout na SMF vlákno, aby byl zajištěn mechanicky pevný spoj a přitom minimalizována možnost kolapsu mikrostruktury [18][19].

Dalším důležitým parametrem svařovacího procesu je přesah. Je to vzdálenost, o kterou se vlákna po natavení překrývají, aby se při natavení dotkla a vytvořil se pevný spoj. Malý přesah nevyvine dostatečnou sílu a výsledný spoj bude křehký. Velký přesah může způsobit odklon spoje vláken od osy šíření a zvýšit útlum na spoji. Proto je volba přiměřeného přesahu jedním z klíčových parametrů svařovacího procesu. Je tak zajištěno menší tepelné namáhání u PCF a zároveň dostatečné nahřátí SMF Obr. 2.2 a 2.3 a) [14] [15] [16] [20].



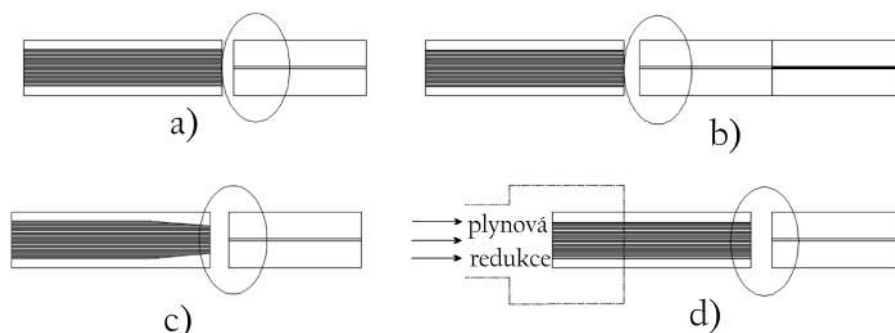
Obr. 2.2: Schématické znázornění sestavení vláken před svárem.

2.4.2 Metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře

Další možnou technikou je metoda svařování, která využívá zvýšený tlak plynu v mikrostruktuře. Tlak plynu snižuje kolaps mikrostrukтуры při svařování. V této technice je kolaps mikrostrukтуры řízen nejen pomocí redukce tepla. Kolaps mikrostrukтуры je řízen pomocí tlaku plynu uvnitř vlákna. Proto může být vlákno ve středu výboje. Pomocí této metody je možné vytvořit spoj s minimální deformací mikrostrukтуры. Těto vlastnosti se dá využít zejména u vláken s dutým jádrem, která jsou ve srovnání s PCF vlákny s pevným jádrem náchylnější na deformace mikrostrukтуры Obr. 2.3 d) [15] [17].

2.4.3 Metoda vloženého vlákna

Metoda je určena pro vlákna s rozdílným MFD, kde rozdíl MFD způsobuje velký útlum. Útlum nastává i přesto, že se podaří udržet mikrostrukтуру na spoji v dob-



Obr. 2.3: Rozdílné principy svařování PCF vláken; a) posunem obloukového výboje z oblasti výboje - minimalizace hroucení mikrostruktury, b) spojení pomocí vloženého vlákna - snížení rozdílu MFD, c) pomocí částečného kolapsu mikrostruktury - snížení rozdílu MFD, d) pomocí tlaku plynu uvnitř PCF - minimalizace kolapsu mikrostruktury.

rém stavu. Pro tento případ lze použít vložené vlákno jako most pro snížení vlivu rozdílného MFD. Jednou z možností je použití vlákna s malým jádrem tak, aby korespondovalo s MFD PCF vlákna. Druhý konec vlákna se tepelně upraví tak, aby MFD vloženého vlákna a SMF vlákna byl shodný Obr. 2.3 b) [14].

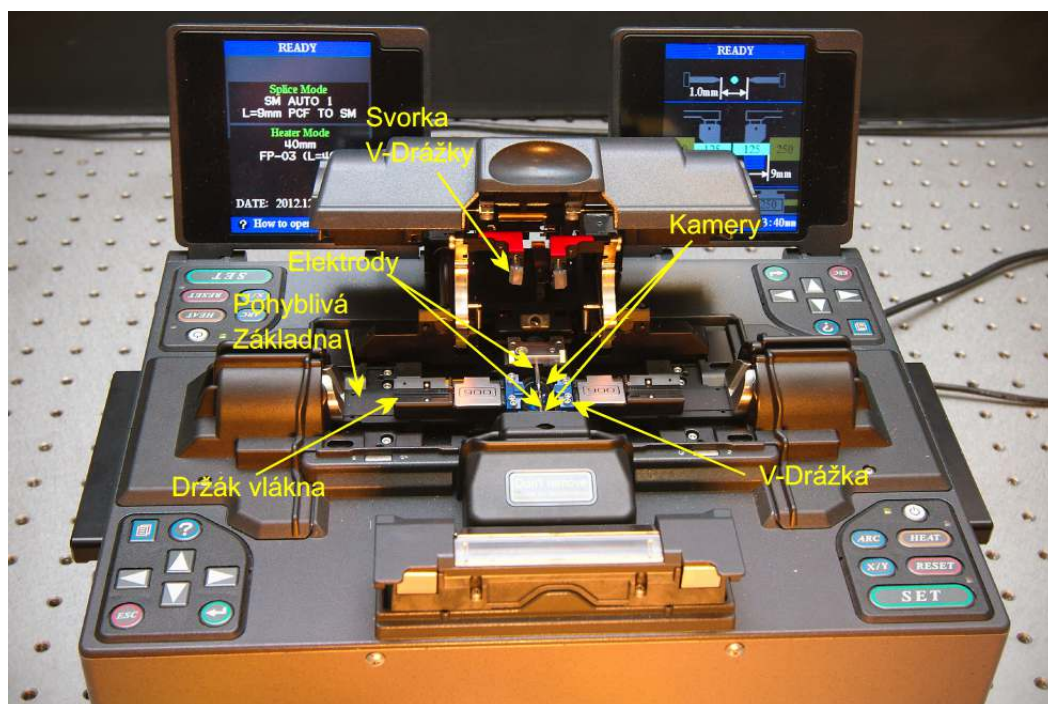
2.4.4 Metoda řízené deformace mikrostruktury

Dalším možným způsobem jak snížit útlum způsobený rozdílným MFD je kontrolované částečného kolapsu mikrostruktury u PCF. Při této metodě se vlákna svaří metodami z kap. 2.4.1 nebo 2.4.2 s minimální deformací struktury a poté se opakovanými malými výboji dosáhne částečného kolapsu mikrostruktury, která způsobí zvětšení MFD, viz. Obr. 2.3 c) [14] [21].

3 REALIZACE SVAŘOVACÍHO PROCESU

PCF vlákna jsou v dnešní době velice populární zejména díky svým speciálním vlastnostem. V mnoha aplikacích, ve kterých se používá standardních vláken, by bylo jednodušší použít vlákna PCF. Vzhledem k ceně PCF vlákna není možné jimi realizovat celou trasu, ale je nutné spojovat vlákna se standardními vlákny. Napojení na konvenční optický systém je ale stále překážkou a hlavním cílem mnoha institucí. Požadavky na kvalitu přípravy vlákna i svařovacího procesu dalece přesahují postupy využívané pro standardní vlákna.

Svařovací proces pro vlákna PCF-SMF byl optimalizován pro svařovací automat Fujikura FSM 100P Obr. 2.1, která se nachází na KO ÚPT AVČR v.v.i. Dnes jsou na trhu systémy umožňující podrobnější nastavení parametrů pro speciální svařování optických vláken, jako LDS II od NorthLab photonics nebo GPX-3000 od firmy Vytran. Nevýhodou těchto systémů jsou vysoké pořizovací náklady a složitější nastavení procesu, které komplikují použití v běžném laboratorním provozu.



Obr. 3.1: Svařovací automat Fujikura FSM 100P.

Vnitřní část svařovacího automatu FSM 100P se skládá z pohyblivé základny,

kteřá se posouvá v ose Z a zároveň má možnost otáčet se kolem této osy. Přesnou polohu konců vláken v osách X a Y zajišťují V drážky, které jsou díky své konstrukci schopné v těchto osách jemně nastavit polohu vlákna. Držáky vláken jsou na základně uchyceny pomocí magnetů a jejich přesná poloha je fixována dvěma kolíky. Držáky vláken jsou použity při celém procesu od čištění vlákna po zalomení. Slouží po svařování jako upevňovací prvek, který zjednodušuje manipulaci s vláknem. Kamerový systém v osách X a Y snímá optická vlákna v reálném čase a umožňuje měření a kontrolu vláken během celého procesu. Poslední z hlavních částí jsou elektrody, mezi kterými vzniká elektrický oblouk, který taví skleněné vlákno. Svařovaná optická vlákna lze díky přesnému polohovacímu mechanismu umístit do kteréhokoli místa elektrického oblouku. Tím lze výrazně ovlivňovat svařovací proces a docílit např. pouze zúžení optického vlákna atd.

Optické vyhodnocení svárů probíhá na připojeném PC. Výstupy ke každému realizovanému sváru se ukládají na PC pro pozdější spravování. Data ze svařovacího automatu jsou nahrána do programu Microsoft Excel pomocí makra, kterým lze z počítače svařovací automat i částečně řídit. V MS Excel je vytvořena tabulka obsahující veškeré parametry nastavení svařovacího procesu včetně fotografií z průběhu svařovacího procesu a konečného stavu sváru [22].

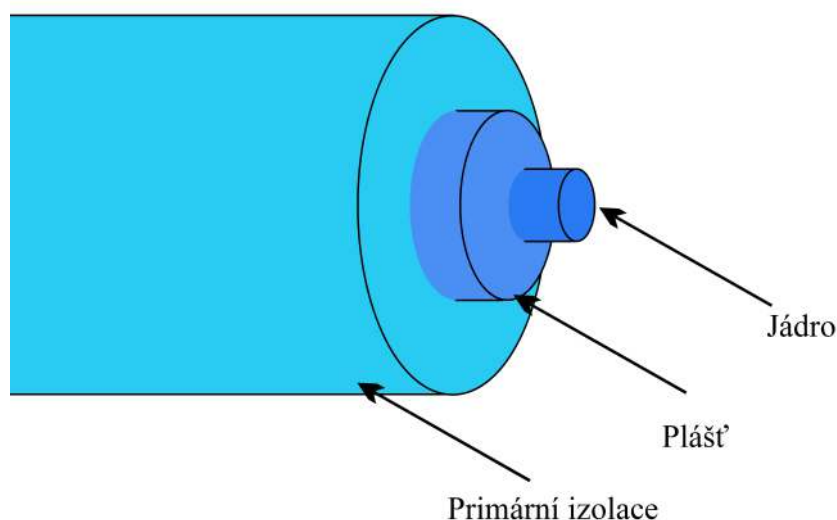
Jedním z nejdůležitějším faktorem při svařování optických vláken v průběhu celého svařovacího procesu je samotná příprava. Při přípravě vlákna hrají důležitou roli dva základní parametry: čistota vlákna a zalomení.

3.1 Příprava vláken

Příprava vláken je při svařování klíčová, ať už je to odstranění primární izolace, čištění nebo lámání. Jinak tomu není ani u přípravy PCF vláken. V tomto ohledu jsou PCF vlákna ještě náročnější a některé používané postupy jsou pro PCF vlákna zcela nevhodná.

3.1.1 Stripování vláken

Všechna vyráběná optická vlákna jsou pro běžná použití velice křehká, proto jsou z výroby opatřena minimálně primární izolací, která zlepšuje mechanické vlastnosti vlákna. Primární ochrana je většinou akrylový nebo polyimidový povlak, který výrazně zlepšuje možnost ohybu vlákna.



Obr. 3.2: Typické standardní vlákno

Pro jakoukoli technologii spojování je nutné vlákna kolmo zalomit, proto je nutné primární izolaci, která má právě lámání vlákna zamezit spolehlivě odstranit. Další ochrany nebývají připojeny pevně k vláknům, a proto nebývá je problém odstranit. Správné odstranění primární ochrany je však klíčové.

U optických vláken je možné použít několik způsobů odstranění primární ochrany. Nejpoužívanější metoda pro odstranění primární izolace z akrylového povlaku je její mechanické odstranění. Pomocí tzv. stripovacích kleští se stáhne primární izolace.

Kleště ale zanechávají malé prasklinky v plášti optického vlákna, které jsou důsledkem mechanického stresu. Pro PCF vlákna je tato metoda nevhodná, protože při mechanickém tlaku často dochází ke zborcení mikrostruktury a zlomení vlákna.

Další metodou je chemické odstranění, tuto metodu není možné použít z důvodu natečení chemikálií do mikrostruktury. Pro odstranění primární izolace je proto třeba použít speciálních metod, které izolaci odstraňují šetrněji například pomocí proudu teplého vzduchu. V současnosti je nejlepším řešením pro odstranění primární izolace stripovací automat 3SAE-ASII od firmy NorthLab Photonic. Principem této stripovačky je proud vzduchu, který má teplotu cca 300 °C. Tato teplota zajistí roztavení akrylového povlaku a vysoký tlak vzduchu odstraní všechny nečistoty a potenciální zbytky. Vlákno je tak připraveno na další práci bez nutnosti dalšího čištění.

V našem případě byla použita tepelně mechanická stripovačka od firmy NorthLab Photonic. Její funkce spočívá v nahřátí akrylového povlaku na teplotu přibližně 100 °C. Povlak nahřátím změkne. Za pomoci mechanických nožů, které na vlákno působí výrazně menší silou než u standardního mechanického stripování, je možné povlak stáhnout. Po odstranění izolace tímto způsobem je však nutné vlákno očistit, protože na něm zůstávají drobné nečistoty.

Polyimidová izolace má lepší tepelnou i chemickou odolnost, proto se odstranění u standardních vláken provádí mnohem agresivnějšími metodami. Často se používá zahřátá kyselina nebo se povlak jednoduše spálí pomocí plynového hořáku. Obě tyto metody způsobují drobné poškození samotného vlákna. Dnes je možné použít k odstranění polyimidových izolací pokročilejší metody. Jedna je například technologie od firmy NorthLab Photonic, kde je pro odstranění povlaku použit trojfázový obloukový výboj, který je možné využít i pro PCF vlákna.

3.1.2 Čištění vlákna

Po většině metod odstranění primární ochrany je nutné optická vlákna očistit od jejich zbytků. Standardní vlákna je možné čistit chemicky. Čištění se provádí pomocí isopropylalkoholu a ultrazvukové čističky nebo odmaštěným ubrouskem. Pro vlákna PCF tento proces použít nelze. Ponořením konce vlákna do kapaliny, by se mikrostruktura zachovala jako kapiláry a zaplnila by se čistícím médiem. To by ovlivnilo

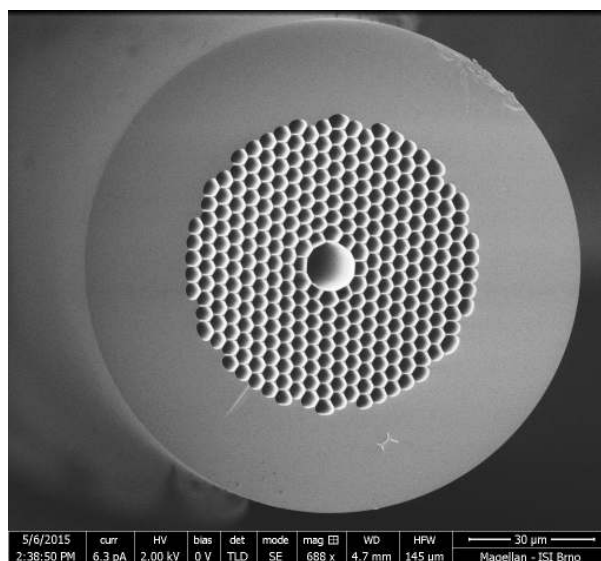
svařovací proces současně by se změnila i základní optické vlastnosti vlákna. Aby se zamezilo kontaminaci struktury PCF vlákna, je nutné čistit pouze před zalomením, aby se vyhnulo kontaminaci vnitřní struktury. Proto je třeba provést Zalomení vlákna neprodleně po očištění.

3.1.3 Lámání vlákna

Nejběžnější metody lámání vláken jsou pomocí korundových nebo diamantových nožů, u kterých se používá přímé nebo kotoučové ostří. U některých lámaček je nůž doplněn o ultrazvukové kmity, které zlepšují kvalitu lomu. Nůž u lámačky vlákno nařízne a poté se vlákno v místě naříznutí zlomí. U PCF vláken tento princip lámání v některých případech způsobuje uštípnutí části vlákna v místě zlomu.

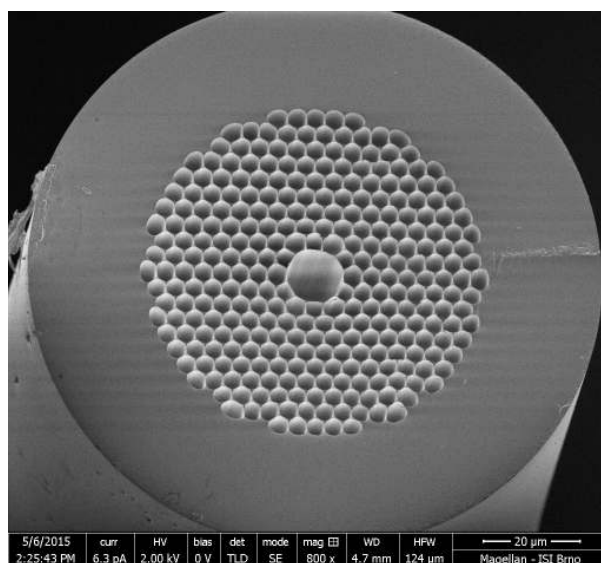
V laboratoři jsme testovali lámačku CT 100, kde probíhá lámání na předepnutém vlákně. Diamantový nůž nařízne jednu stranu vlákna a pnutí způsobí, že se vlákno přetrhne v místě naříznutí. Pnutí je třeba regulovat dle typu vlákna. Nejméně náročná na nastavení úrovně pnutí jsou standardní vlákna. Úhel lomu lámáných optických vláken závisí na jejich úrovni předpnutí. Pro různá vlákna se výrazně mění tolerance nastavení úrovně předpnutí. Lámačka CT 100 také umožňuje při lámání zkroucení vlákna, které definuje případný definovaný úhel lomu. U vláken PCF dochází v některých případech při velkém pnutí k odštípnutí části pláště v místě naříznutí. Důsledkem toho je pak nežádoucí velký úhel zalomení. Nedostatečné pnutí pak vede k vysokým úhlům lomu nebo nedojde k lomu vůbec. Při použití lámačky CT 100 docházelo v některých případech k rozdrčení vlákna při přichycení do kovové kleštiny nebo při napnutí vlákno samovolně prasklo. Nepodařilo se nalézt nastavení lámačky, při kterém by bylo možné lámat PCF vlákna opakovaně se stejnými výsledky.

Pro lámání PCF vláken byla testována vhodnost lámaček CT 32 a CT 100. Jak je znázorněno na Obr. 3.3 a 3.4, zalomením PCF Vlákná nedochází ani u jedné z lámaček k poškození mikrostruktury. Proto je možné použít klasickou lámačku s kotoučovým řezacím nožem. Nedochází zde k rozdrčení vlákna. Vzhledem k problémům s lámačkou CT 100 pro další testování svařovacího procesu bylo využíváno pouze lámačky CT 32 u níž je vysoká reprodukovatelnost kvality zalomení. Navíc je



Obr. 3.3: Zalomení lámačkou CT 32.

pro uchycení do jejího mechanismu zapotřebí méně vláknů a dochází tak k menším ztrátám při jeho lámání.



Obr. 3.4: Zalomení lámačkou CT 100.

Správně zalomené vlákno se pak již vkládá do svařovacího automatu, kde probíhá svařovací proces.

3.2 Svařování PCF-SMF vláken

Svařování optických vláken je v dnešní době jejich nejvíce rozšířenou formou spojování. Pro standardní vlákna nepředstavuje žádný problém uskutečnit svár s minimálním útlumem. Různé aplikace mnohdy vyžadují speciální optická vlákna např. PCF nebo PM (Polarization maintaining) vlákna. Vytvořit svár je pak velice náročné na nastavení různých parametrů svařovacího procesu, které u standardních vláken neměly vliv na kvalitu spoje. V této části práce je popsán vývoj technologického procesu pro realizaci nízko-útlumového sváru mezi vlákny HC 1550-2 a SMF28. Ke svařování těchto vláken je možné využít několik možných svařovacích postupů.

Cílem této práce bylo tyto postupy upravit pro svařovací automat FSM 100P a ověřit jejich kvalitu pro následné použití při vývoji frekvenční stabilizace laseru na ÚPT AVČR v.v.i.

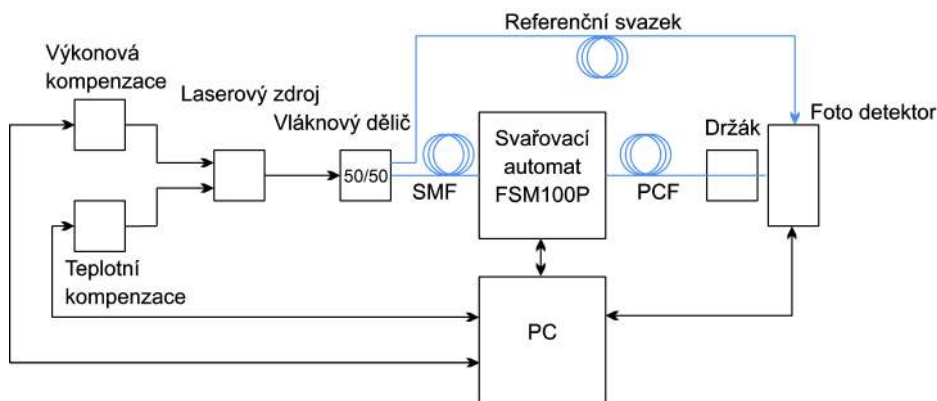
3.2.1 Metoda měření svárů

Před zahájením testování svařovacích metod bylo nutné připravit testovací metody pro kvalitu sváru. První krok vyhodnocení sváru byl optický, tj. pouze kontrolou záznamu sváru ze svařovacího automatu. V tomto případě bylo možné již zjistit masivní kolaps makrostruktury a případně vyloučit další ověřovací metody. Obvykle se následně přistoupilo k měření útlumu realizovaného spoje. Při průchodu světelného signálu vlnovodem dochází ke ztrátě jeho energie, veličinou charakterizující tento jev je útlum [23]. Útlum optické trasy lze snadno vypočítat pomocí vztahu :

$$A = 10 \log \frac{P_{REF}}{P_{PCF}} \quad (3.1)$$

Na Obr. 3.5 je znázorněno schéma měření. Z laserového zdroje byl navázán svazek přes vláknový dělič 50/50 do svařovaného a referenčního vlákna. Změřením výkonu vycházejícího z referenčního a z PCF vlákna mohl být vypočítán útlum spoje dle vzorce 3.1. Při svařovacím procesu bylo možné vlákna sesadit přesně na dotek a změřit tak útlum vláken bez sváru. Z měření pak bylo možné vypočítat i útlum způsobený rozdílnými vlastnostmi svařených vláken.

Měření útlumu bylo prováděno optickým měřičem výkonu PM100A a zdroj laserového záření s vlnovou délkou 1550 nm byl FOSS-21 od firmy OZ optics. Další testy vláknového sváru pak spočívaly v lepší diagnostice kolapsu mikrostruktury, která byla realizována na optickém mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA.



Obr. 3.5: Schéma měřicího systému.

3.2.2 Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje

Metoda byla popsána mj. v odborném článku [14] se svářečkou optických vláken Ericsson FSU-975. Největším problémem při optimalizaci svařovacího procesu pro jiný přístroj je nejednotnost nastavitelných parametrů, jak je uvedeno v Tab. 3.1. Velikost výboje je u FSU-975 dána proudem protékajícím mezi elektrodami a u FSM 100P je dána kalibrovanou jednotkou STD. Je třeba brát v úvahu i nejednotnost konstantních parametrů, jako je např. rozteč elektrod, která může být mezi různými svářečkami jiná a tím podstatně ovlivňovat svařovací proces.

Rozdílné parametry komplikují převod procesů mezi těmito svářečkami, a proto bylo třeba tento svařovací proces přepracovat. Základem byly parametry pro svářečku FSU-975 uvedené v Tab. 3.2. První optimalizace spočívala v úpravě výkonových parametrů předehřevu a hlavního výboje.

Výkon při prvním sváru byl stanoven jako poměr výkonů používaných při svařování SMF vláken. Teoretická hodnota výkonu svařovacího pulzu byla vypočítána na

Tab. 3.1: Nastavitelné parametry pro svařovací proces.

Svářečka	Fujikura FSM 100P	Ericsson FSU-975
Předehřev	bit	mA
Doba předehřevu	s	s
Odsazení vláken (GAP)	μm	μm
Doba výboje	s	s
Energie výboje	bit	mA
Střed vláken	μm	μm

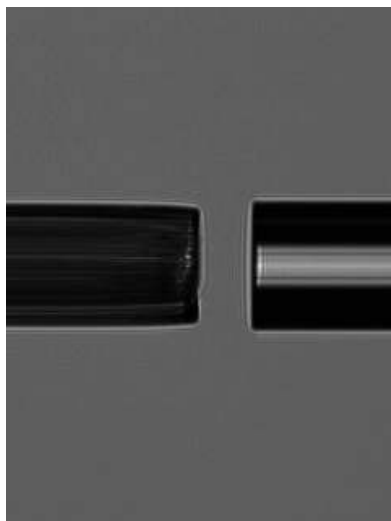
Tab. 3.2: Optimalizované parametry pro FSU-975.

Předehřev	5 mA
Doba předehřevu	0,2 s
Odsazení vláken(GAP)	50 μm
Doba výboje	0,3 s
Energie výboje	9 mA
Střed vláken	L-50 μm

$S = -200$ bit. Při následném provedení prvního sváru byl zjištěn vliv čistícího výboje na deformaci mikrostruktury (zakulacení mikrostruktury na konci vlákna) viz. Obr. 3.6, který mohl ovlivnit kvalitu sváru. Pro následné sváry byl výkon čistícího výboje postupně redukován.

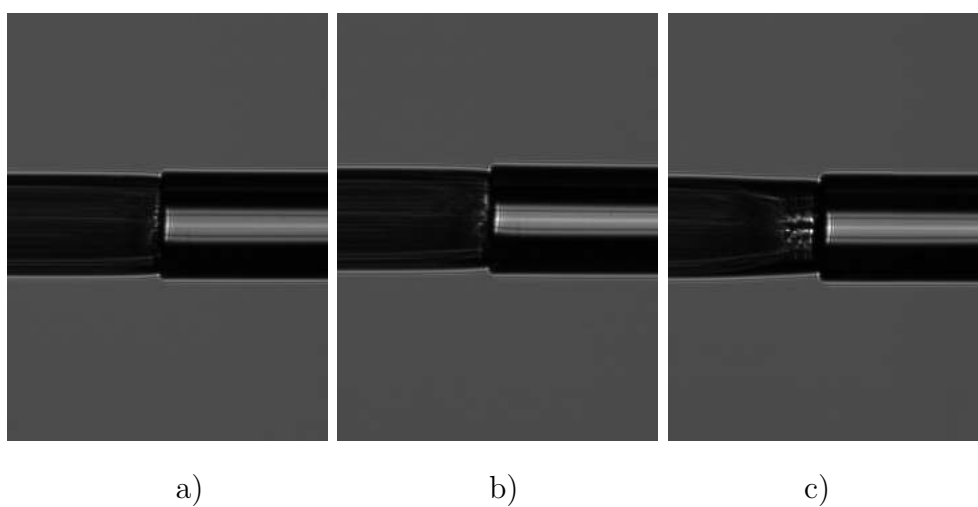
První testovaný spoj byl na základě optického vyhodnocení akceptovatelný, ale pevnostní test implementovaný ve svařovacím automatu ukázal, že vlákna nejsou pevně spojená. Pro zvýšení pevnosti spoje bylo přistoupeno ke zvyšování výkonu výboje. Zvyšování výkonu hlavního výboje vedlo k větším deformacím na mikrostruktuře, ale bez větších změn na pevnost spoje viz. Obr. 3.6.

Zvyšování výkonu hlavního výboje nemělo pozitivní vliv na pevnost spoje. Dalším testovaným parametrem proto byl vybrán výkon předehřevu. Rozdíl mezi hlavním výbojem a předehřevem v tomto svařovacím procesu je malý, proto byl očekáván



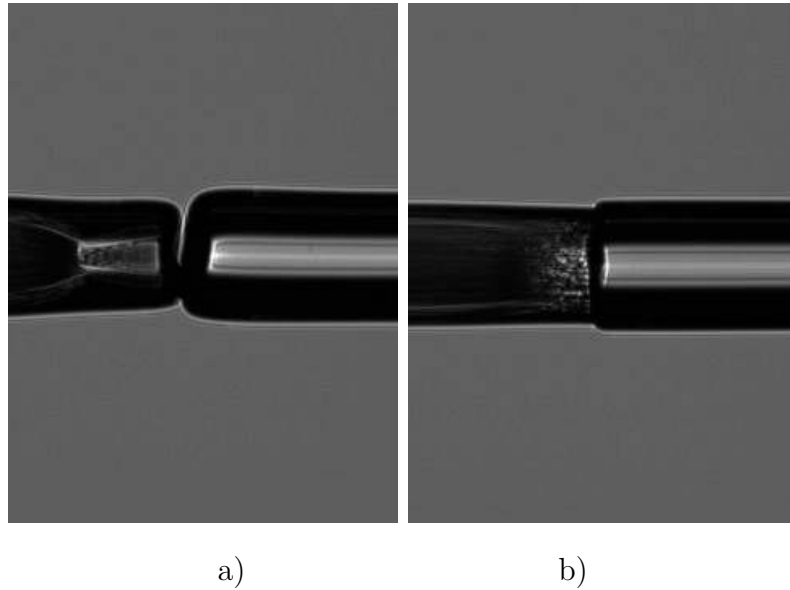
Obr. 3.6: Vlákna před prvním svárem.

velký vliv na kvalitu sváru.



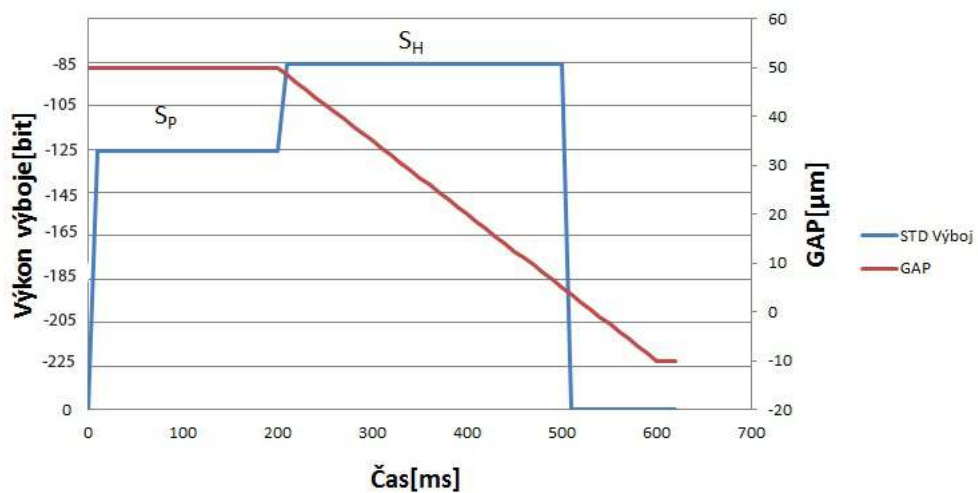
Obr. 3.7: Ukázky realizovaných svárů pro výkon předehřevu $S_P = -200$ bit a hlavního výboje; a) $S_H = -150$ bit, b) $S_H = -100$ bit, c) $S_H = 0$ bit.

Energie hlavního výboje byla nechána na hodnotě standardní $S_H = 0$ bit. Výkon předehřevu byl postupně zvyšován až na hodnotu $S_P = -50$ bit. Při tomto výkonu se už celá mikrostruktura ve vláknech zborčila viz Obr. 3.8 a).

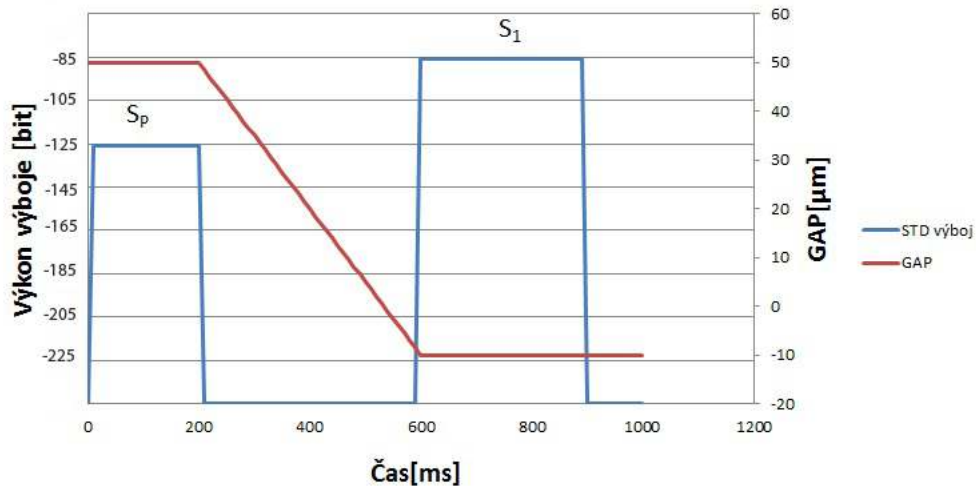


Obr. 3.8: Testované sváry s parametry $S_P = -50$ bit $S_H = 0$ bit, a) $G = 50 \mu m$ b) $G = 15 \mu m$.

Po otestování výkonu předeřevu a hlavního výboje, kde nedošlo k výraznějším změnám v pevnosti svárů, byl pro ověření vlivu na svár, na základě předchozích zkušeností vybrán parametr odsazení. Hodnota byla nastavena na hodnotu používanou u SMF vláken $G = 15 \mu m$. Při této změně bylo poškození mikrostruktury jen mírně viz. Obr 3.8 b), i když energie výbojů zůstala zachována.



Obr. 3.9: Svařovací profil s hlavním výbojem.



Obr. 3.10: Optimalizovaný svařovací profil.

Poškození bylo způsobeno hlavním výbojem, který je spuštěn s funkcí přibližování, jak je zobrazeno na Obr. 3.9. K mikrostruktuře vlákna se může dostat podstatná část energie a poškodí ji. Pro další pokračování byl hlavní výboj vyřazen a nahrazen speciální funkcí, která se aktivuje až po spojení vláken viz. Obr. 3.10, kde je naznačen rozdíl mezi sekvencí výbojů a posunu vláken pro spoje PCF-SMF. Časový průběh z Obr. 3.10 nebyl dále upravován, pouze se v dalším postupu měnily výkony výbojů a posun středu výboje. Sledovanými parametry daných spojů bylo zhroucení mikrostruktury, které odpovídá útlumu spoje a tahová pevnost spoje.

Svařovací proces dle přepočtených hodnot z literatury

Při ladění svařovacího procesu bylo vycházeno z literatury [14], v Tab. 3.3 jsou uvedeny hodnoty pro svařovací automat FSM 100 P. Nastavením uvedených výkonů došlo k optickému zlepšení sváru (menší kolaps mikrostruktury) viz. Obr. 3.11 Úpravou svařovacího procesu dle grafu na Obr. 3.10 došlo k optickému zlepšení sváru. Bylo možné vytvořit sváry, které vyhověly internímu pevnostnímu testu. Poškození mikrostruktury bylo však stále zřetelné a minimální dosažený útlum spoje byl $A = 2.84$ dB.

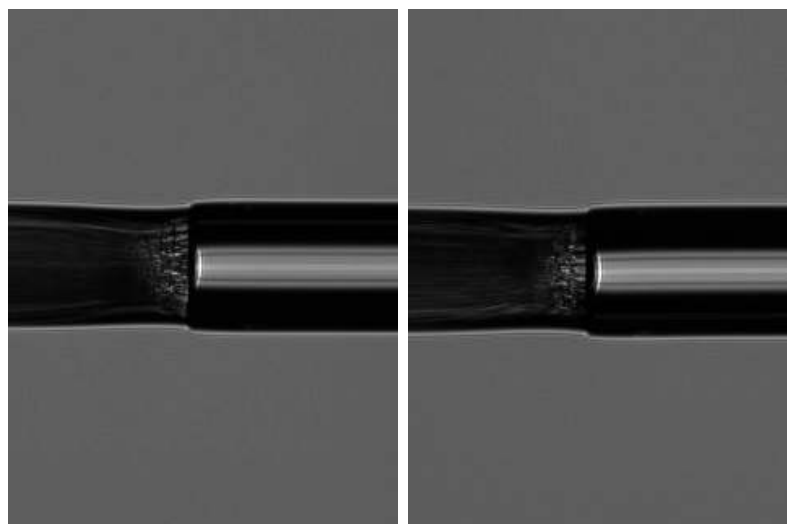
Takto nastavený svařovací proces byl dále upravován tak, aby bylo dosaženo nižšího útlumu spoje při jeho dostatečné pevnosti.

Optimalizace svařovacího procesu s důrazem na pevnost spoje

V další fázi úpravy svařovacího procesu bylo přistoupeno ke změně výkonu výbojů tak, aby docházelo k menšímu poškození mikrostruktury. Bylo provedeno několik svárů s různým nastavením výkonů výbojů. Výsledné nastavení svařovacího procesu v Tab. 3.3 je kompromisem mezi útlumem spoje (kolapsem mikrostruktury) a jeho pevností. Fotografie realizovaného sváru jsou na Obr. 3.11. Další úpravy svařovacího procesu vedly k většímu útlumu spoje nebo ke ztrátě jeho pevnosti.

Tab. 3.3: Svařovací parametry pro svár s velkou pevností, Obr. 3.11.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	dB
-125	200	-20	300	10	0,15	L-50	2,84

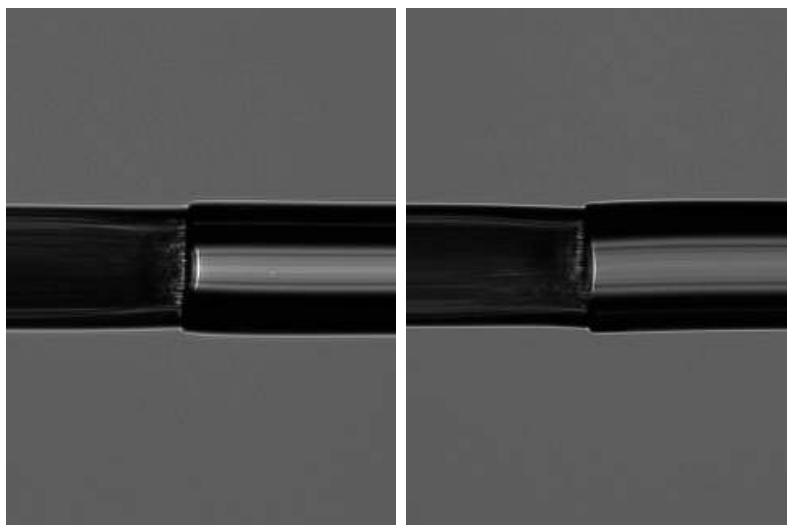


Obr. 3.11: X,Y pohled na typický svár pro $S_1 = -20$ bit a velkou pevností spoje parametry z Tab. 3.3.

Dalších úprav procesu, které se týkaly změn výkonů výbojů se neprojevovaly ve změně útlumu spoje. Například úprava dle Tab. 3.4, která způsobila snížení pevnosti celého sváru. Realizovaný svár na Obr. 3.12, který vykazuje vizuálně nejmenší poškození mikrostruktury. Při tomto nastavení svár již neprošel interním testem pevnosti.

Tab. 3.4: Svařovací parametry pro svár se sníženou pevností, Obr. 3.12.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	dB
-100	200	-12	300	15	0,15	L-75	2,75



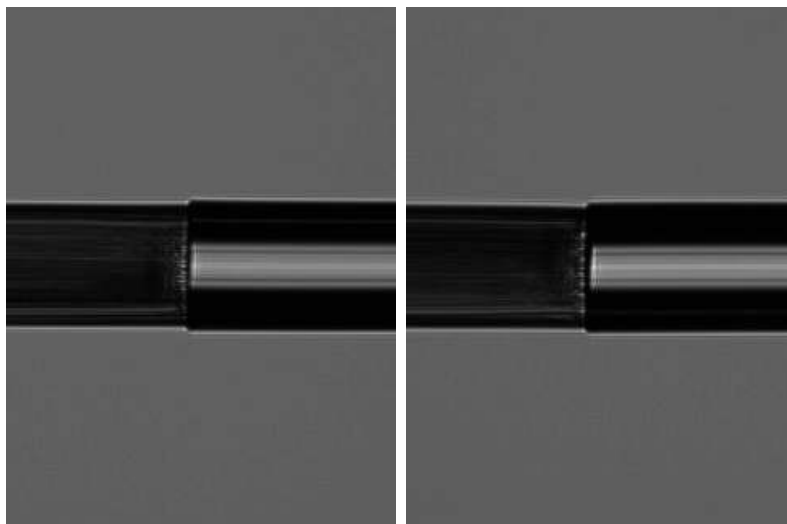
Obr. 3.12: X,Y pohled na svár, který neprošel testem pevnosti, parametry v Tab. 3.4.

Optimalizace svařovacího procesu s důrazem na minimalizaci útlumu spoje

V další fázi úpravy svařovacího procesu bylo přistoupeno k optimalizaci útlumu svařovaného spoje při snížení jeho pevnosti. Ze svařovacího procesu byl vyřazen test pevnosti a postupnou úpravou, zejména snižováním výkonu bylo dosaženo nižších útlumů spoje. viz Obr. 3.13 3.14. Nejnižšího útlumu bylo dosaženo na sváru 3.14. Při dalším snižování výkonu hlavního výboje byl svařovaný spoj příliš křehký pro další použití.

Tab. 3.5: Svařovací parametry pro svár s nízkou energií výboje, Obr. 3.13.

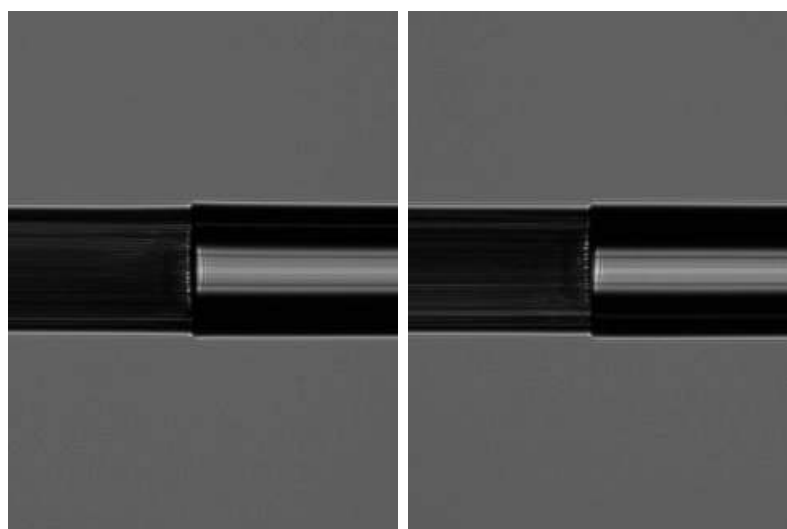
Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	dB
-125	200	-75	300	10	0,15	L-50	2,2



Obr. 3.13: X,Y pohled na svár pro výkon $S_1 = -75$ bit dle parametrů z Tab. 3.5.

Tab. 3.6: Svařovací parametry pro svár s minimální pevností spoje na Obr. 3.14.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	dB
-125	200	-85	300	10	0,15	L-50	2,02



a)



b)

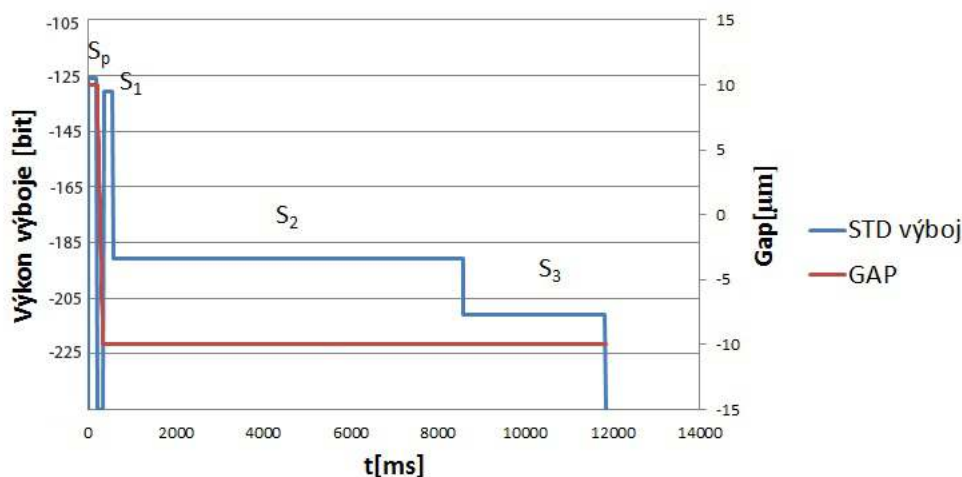
Obr. 3.14: Svár výkonem $S_1 = -85$ bit a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, s parametry sváru z Tab. 3.6.

Na Obr. 3.14 je Fotografie sváru pod optickým mikroskopem, který umožňuje lepší detail mikrostruktury. Mikrostruktura je i při tomto nastavení stále lehce deformovaná.

Tato metoda spojování PCF vláken byla prakticky ověřena a bylo dosaženo jejich limitů. Vlákná svařována touto metodou vykazovala minimální útlum spoje $A = 2,02$ dB. Negativní vliv této metody je podstatné snížení pevnosti samotného spoje, proto je nutné omezit mechanické namáhání spoje.

3.2.3 Metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje s více výboji

Úpravami předchozí metody již nebylo možné dosáhnout lepších výsledků v oblasti snížení útlumu ani v oblasti zvýšení pevnosti spoje. Bylo však ověřeno, že snížení útlumu svařovaného spoje je možné dalším snižováním výkonu některého z výbojů. Proto bylo přistoupeno k úpravě časové závislosti svařovacího procesu z Obr. 3.9. Obdobné metody změn svařovacího procesu, úpravami časových průběhů a množství výbojů byly již publikovány např. [24].



Obr. 3.15: Schéma svařovacího procesu pro metodu s více výboji.

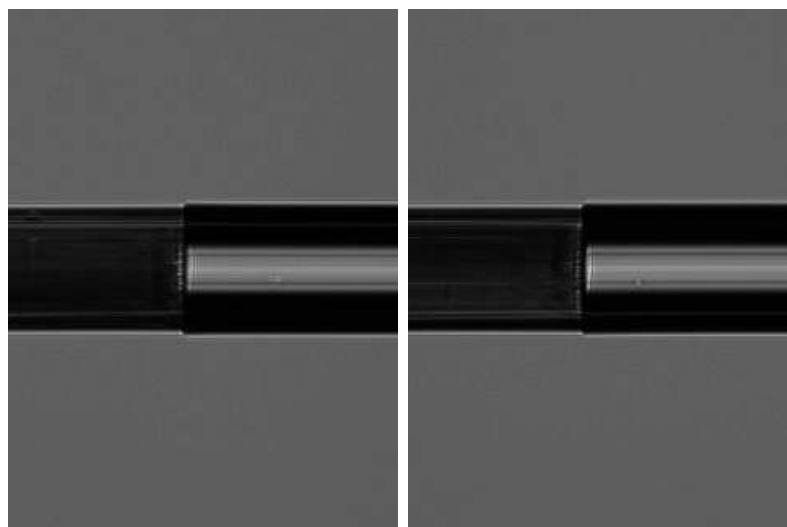
Prodloužení doby trvání jednotlivých pulsů vede k možnosti snížit maximální energii daných pulsů. Na Obr. 3.15 je znázorněn graf sekvence výbojů, kde jsou

přidány dva dlouhé nízkoenergetické pulsy za dva velmi krátké vysokoenergetické na začátku procesu. Střed obloukového výboje je posunut pouze o $C = 10 \mu\text{m}$ směrem k SMF vláknu ve srovnání s posunem $C = 50 \mu\text{m}$ v předchozím případě. I přesto dochází k výrazně menšímu kolapsu mikrostruktury ve svařovaném spoji.

Přidané výboje zvýšily pevnost svařovaného spoje a přitom neovlivnily strukturu PCF vlákna. Proto bylo možné snížit výkon výboje 1 až na $S_1 = -130$ bit bez zhoršení konečné pevnosti spoje. Postupným snižováním výkonu v přidaných pulsech se snižovala pevnost spoje a současně klesal i jeho útlum. Minimální dosažený útlum spoje byl $A = 1,24$ dB při zachování manipulační pevnosti spoje, viz. Obr. 3.16 a 3.17.

Tab. 3.7: Svařovací parametry pro svár s nízkými výkony výbojů na Obr. 3.16.

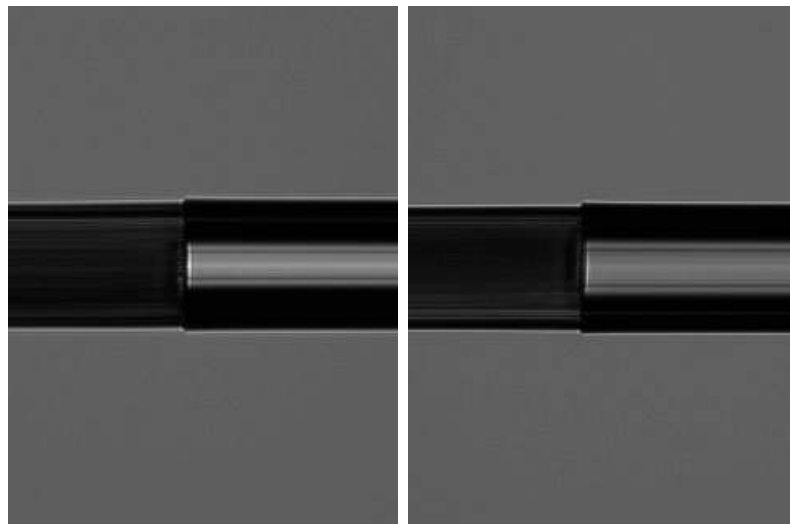
Přehřev S_P	Doba přehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje 1	Výboj 2 S_2	Doba výboje 2	Výboj 3 S_3	Doba výboje 3
bit	ms	bit	ms	bit	ms	bit	ms
-125	200	-130	200	-180	8000	-190	3000
Přesah		Rychlost posuvu		Střed výboje C		Útlum A	
μm		$\mu\text{m/s}$		μm		dB	
10		0,15		L-10		1,70	



Obr. 3.16: X,Y pohled na svár pro výkon $S_1 = -130$ bit $S_2 = -180$ bit $S_3 = -190$ bit dle parametrů z Tab. 3.7.

Tab. 3.8: Svařovací parametry pro svár s minimální pevností spoje na Obr. 3.17.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje 1	Výboj 2 S_2	Doba výboje 2	Výboj 3 S_3	Doba výboje 3
bit	ms	bit	ms	bit	ms	bit	ms
-125	200	-130	200	-190	8000	-210	3000
Přesah		Rychlost posuvu		Střed výboje C		Útlum A	
μm		$\mu\text{m/s}$		μm		dB	
10		0,15		L-10		1,24	



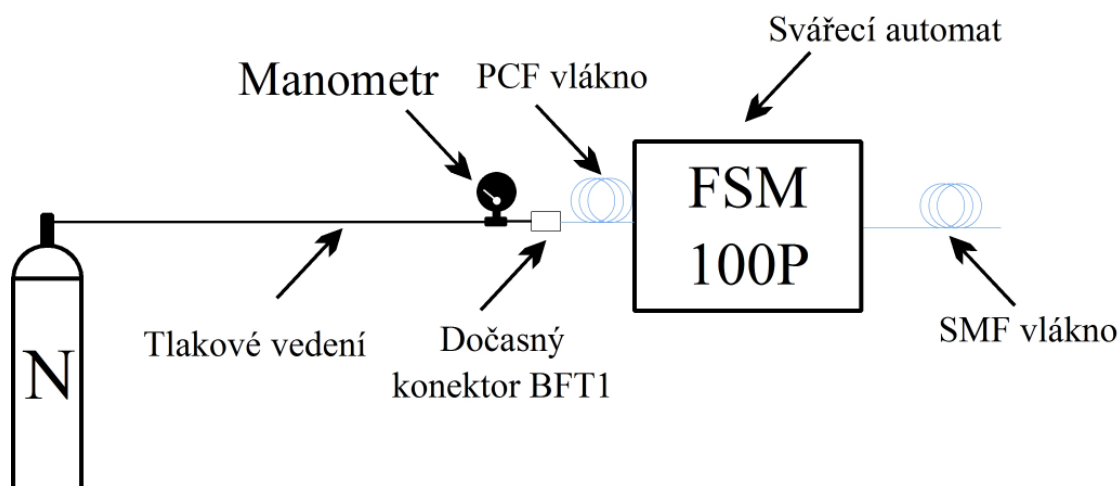
Obr. 3.17: X,Y pohled na typický svár pro výkon $S_1 = -130$ bit $S_2 = -190$ bit $S_3 = -210$ bit dle parametrů z Tab. 3.8.

Vylepšení metody o doplnění dalších nízkovýkonových výbojů v průběhu svařování mělo pozitivní vliv na pevnost spoje. Při zachování pevnosti vlákna bylo možné snížit výkon prvních výbojů a tím snížit útlum $A \leq 2$ dB. Další změny svařovacího procesu v časové a výkonové oblasti již nevedly k relevantnímu zlepšení. Testy s

výrazně více výkonovými pulsy by podle aktuálních znalostí a zkušeností nevedly k dalšímu snížení útlumu a zachování minimální manipulační pevnosti svařovaného spoje.

3.2.4 Metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře

Další změny parametrů u předchozích uvedených metod již nevedly k lepším parametrům realizovaných svárů. Proto byla realizována nová metoda, jejímž základem je stejně jako u jako u předešlých metod, snížení výkonu svařovacího výboje. Aby však bylo možné dosáhnout pevného sváru s nižším útlumem, které je u této metody realizováno tlakem plynu uvnitř mikrostruktury během svařování.



Obr. 3.18: Schéma napojení tlakové nádoby na mikrostrukturu PCF vlákna.

Při tomto experimentu byla použita tlaková nádoba s dusíkem, která byla připojena k volnému konci mikrostrukturního vlákna. Tlak plynu byl ovládán redukčním ventilem. Pro přesnější nastavení tlaku byl použit manometr, který byl do systému zapojen co nejbližší k PCF vláknu.

Napojení tlakového rozvodu na PCF vlákno bylo provedeno pomocí dočasného konektoru BFT1 s koncovkou SMA905 od firmy Thorlabs. Tento konektor poskytl dostatečnou těsnost pro tlakování vlákna. Pro nastavení svařovacího procesu byl ve všech případech využit optimalizovaný svařovací profil z Obr. 3.10, kde byly prováděny změny pouze ve velikosti hlavního výboje a pozici výboje.

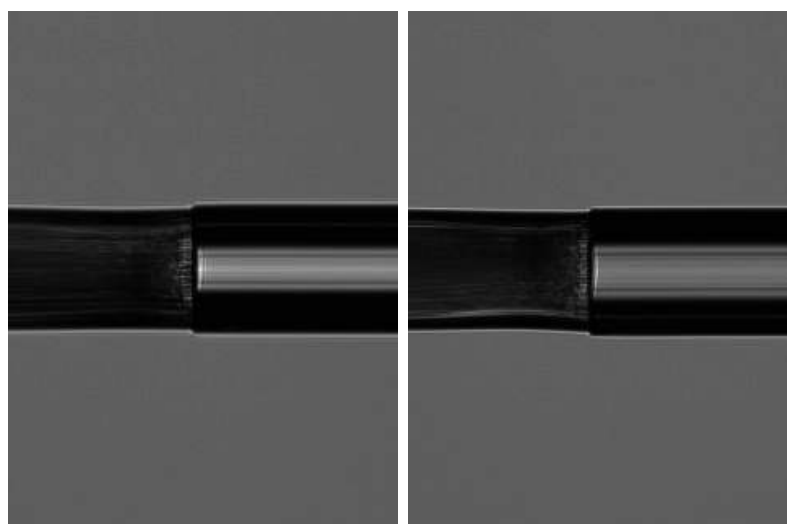
V první fázi byly realizovány sváry, které vydrží interní pevnostní test svařovacího automatu.



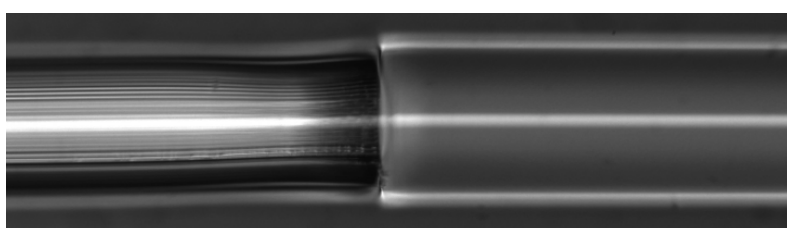
Obr. 3.19: Dočasný konektor BFT1 s koncovkou SMA905 napojený na rozvod stlačeného dusíku.

Tab. 3.9: Svařovací parametry pro svár s velkou pevností spoje, Obr. 3.20.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Tlak plynu P	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	bar	dB
-125	200	-20	300	10	0,15	CENTER	1,4	2.6



a)



b)

Obr. 3.20: Typický svár pro $S_1 = -20$ bit a $P = 1,4$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.9.

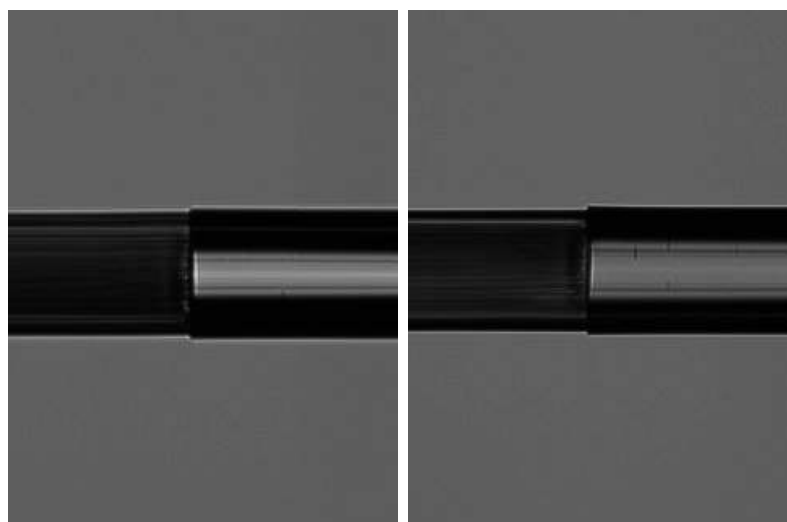
Na Obr. 3.20 je uveden typický příklad sváru pro výkon $S_1 = -20$ bit, který je ještě natolik pevný, že projde testem pevnosti po svaření. Při tomto výkonu výboje jsme

testovali tlak plynu v rozsahu $P = \langle 1,4; 2,5 \rangle$ bar. Změna tlaku při tomto vysokém výkonu hlavního výboje nemá vliv na zlepšení kolapsu mikrostruktury. Útlum takto svařeného spoje byl pro různé tlaky plynu v rozsahu $A = \langle 2,4; 2,7 \rangle$ dB.

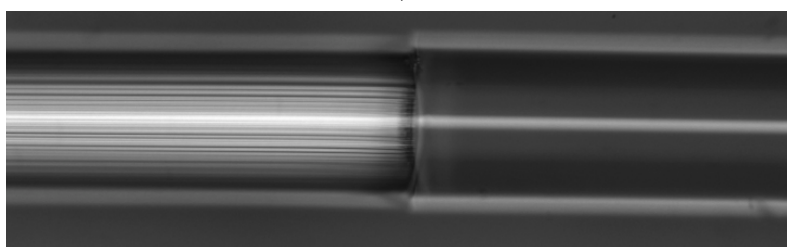
Tab. 3.10: Svařovací parametry pro svár se sníženou pevností spoje, Obr. 3.21.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Tlak plynu P	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	bar	dB
-125	200	-80	300	10	0,15	L-5	1,7	1,01

Další snižování výkonu zvětšovalo křehkost spoje. Pro následné sváry musel být test pevnosti vynechán. Při snížení výkonu výboje 1 na $S_1 = -80$ bit, začal být patrný vliv tlaku plynu na mikrostrukturu spoje viz. Obr. 3.21. Nejnižšího útlumu spoje $A = 0,94$ dB bylo dosaženo pro tlak plynu $P = 1,8$ bar.



a)

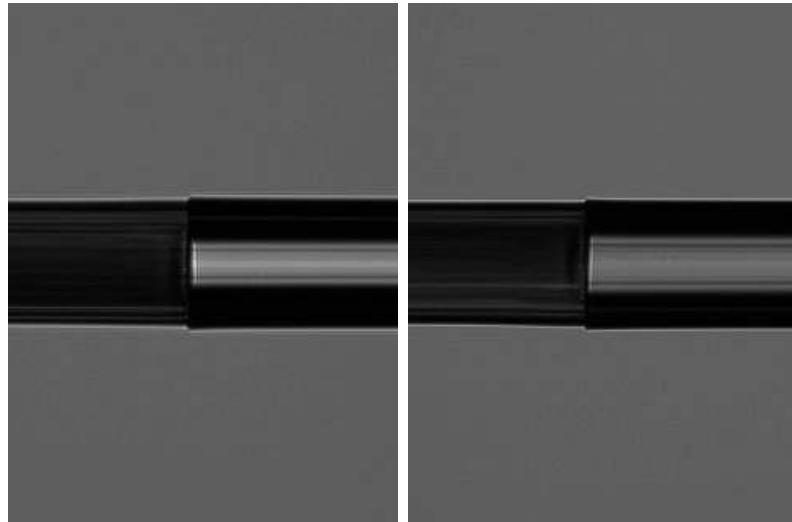


b)

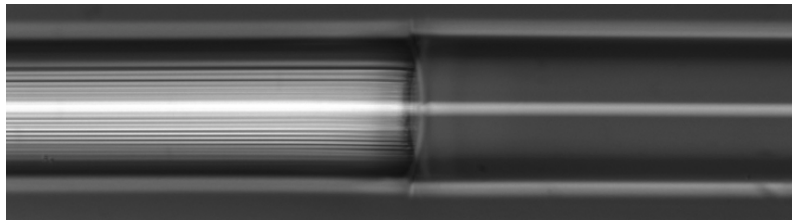
Obr. 3.21: Typický svár pro $P = 1,7$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.10.

Tab. 3.11: Svařovací parametry pro svár s nejnižším dosaženým útlumem, Obr. 3.22.

Předehřev S_P	Doba předehřevu	Výboj 1 S_1	Doba výboje	Přesah	Rychlost posuvu	Střed výboje C	Tlak plynu P	Útlum spoje A
bit	ms	bit	ms	μm	$\mu\text{m/s}$	μm	bar	dB
-125	200	-80	300	10	0,15	L-5	1,8	0,94



a)



b)

Obr. 3.22: Typický svár pro $P = 1,8$ bar a) pohled X,Y, b) fotografie z optického mikroskopu AMSCOPE ME600TZC-10MA, parametry sváru z Tab. 3.11.

Metoda tlaku plynu je nejnáročnější na technické vybavení, ale lze s ní dosáhnout nejmenších útlumů svárů. Vytvořené spoje pomocí této metody měly minimální útlum $A = 0,91$ dB.

Srovnání metod

Všechny metody byly na závěr porovnány z hlediska minimálního dosažitelného útlumu. Postupně byly realizovány optovláknové spoje všemi metodami a poté všemi metodami v kombinaci s metodou tlaku v mikrostruktúře. Výsledky srovnání jsou uvedeny v Tab. 3.12. V tabulce je zobrazen vliv použití plynu u všech testovaných metod. Každý spoj, který byl původně realizován optimalizovanými svařovacími metodami bez použití tlakového plynu vykazuje s použitím plynu lepší útlum. Nejlépe

dopadla metoda se čtyřmi výboji, kde byl naměřen menší útlum než u metody tlaku plynu v mikrostruktuře.

Tab. 3.12: Shrnutí parametrů jednotlivých svárů.

Metoda	Minimální dosažené útlumy bez plynu dB	Minimální dosažené útlumy s plynem dB
Rozdílného nahřívání 2 výboje	2,02	1,57
Rozdílného nahřívání 4 výboje	1,24	0,91
Tlaku plynu v mikrostruktuře	X	0,94

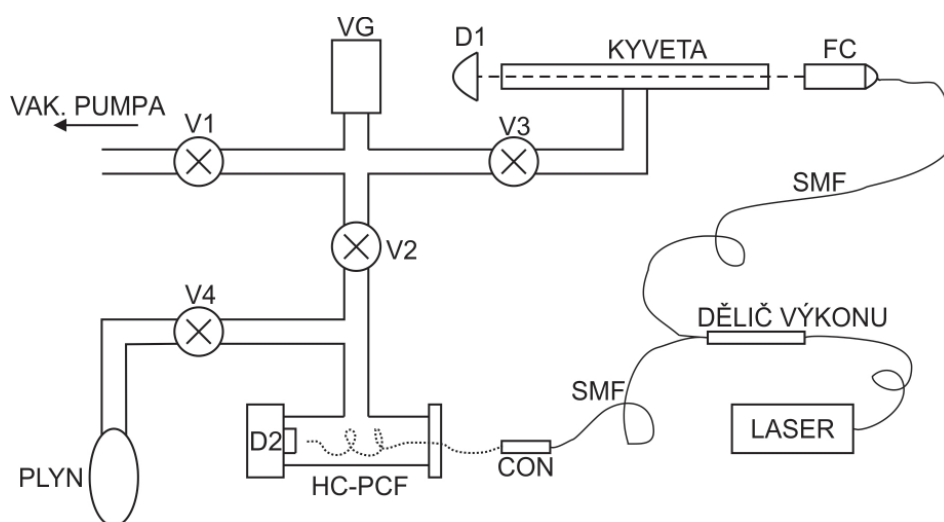
Při měření útlumů bylo zjištěno, že Vlákna HC-1550-2 a SM 28 mají při spojení minimální útlum způsobený rozdílnými vlastnostmi vláken. Tento útlum dosahoval velikosti v průměru $A_{PRUM} = 1$ dB. Po výměně vlákna za jinou výrobní sérii se útlum snížil průměrně na $A_{PRUM} = 0,84$ dB.

Po optimalizaci svařovacího procesu už nezpůsobuje největší útlum svár, ale především nekompatibilita vláken. Pro další snižování útlumu je třeba k vláknu HC 1550-2 najít vhodnější vlákno z řady SMF vláken. Z výrobních odchylek lze spočítat že teoretický útlum mezi vlákny způsobený rozdílným MFD může být až $A = 0,4$ db

3.2.5 Využití techniky svařování PCF vláken

Technika svařování PCF-SMF vláken byla vyvíjena v právě probíhajícímu projektu, který se zabývá plněním PCF vláken. Projekt je zaměřen na testování plnění mikrostrukturních vláken různými plyny a na studiu jejich využití místo standardních absorpčních kyvet pro stabilizaci frekvence laserů. Na Obr. 3.23 je znázorněno schéma používané k ověření využití mikrostrukturního vlákna plněného acetylenem pro stabilizaci frekvence DFB (Distributed Feedback) laserové diody. Otevřený konec vlákna HC-1550-2 je vzduchotěsně uzavřen v komoře a druhý konec vlákna

je svařen k vláknu SMF 28. Pro plnění je použit isotop acetylénu $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$. Laboratorní sestava obsahuje srovnávací absorpční kyvetu, která slouží jako kontrolní prvek správné funkce frekvenční stabilizace s PCF vlákem a současně je určena ke srovnání absorpčních charakteristik mezi kyvetou a optickým vláknem při stejných podmínkách.



Obr. 3.23: Schéma zařízení pro plnění a testování PCF-laserového stabilizátoru.

3.3 Vlastní přínos

Při přípravě této práce jsem se zabýval studiem odborných článků zabývajících se problematikou spojování PCF-SMF vláken. Odborné publikace jsem zpracoval a vyhodnotil obsažené metody z hlediska kvality sváru a reprodukovatelnosti metody. Na základě nastudované literatury a předchozích zkušeností se svařovacím automatem Fujikura FSM 100P jsem samostatně navrhl a ověřil všechny metody uvedené v této diplomové práci. Pro každou metodu jsem optimalizoval svařovací parametry a navrhl jsem a připravil metody měření kvality realizovaných svárů (útlum, kolaps mikrostruktury, pevnost sváru). Pro metodu zvýšeného tlaku plynu v mikrostrukturu jsem navrhl, sestavil a ověřil systém pro čerpání plynu do mikrostrukturního vlákna. Všechny metody jsem vyhodnotil a provedl jejich srovnání. Výsledkem mé práce je pak doporučení svařovat PCF vlákna se SM vlákny kombinací metod svařování s více výboji a se zvýšeným tlakem v mikrostrukturu.

4 ZÁVĚR

V rámci práce byly nastudovány metody svařování mikrostrukturních vláken s vlákny jednovidovými. Příprava vláken před svařovacím procesem byla upravena tak, aby odpovídala specifickým požadavkům pro práci s PCF vlákny. Pro samotný svařovací proces byly navrženy svařovací metody s přizpůsobením parametrů svařovacího automatu Fujikura FSM 100P. Na základě odborné literatury a vlastních zkušeností byly realizovány tři svařovací metody a jejich kombinace.

První z metod byla metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje. Hlavním omezujícím parametrem této metody byla pevnost sváru, která neumožňovala výrazně snížit útlum spoje. Při zachování pevnosti spoje měl svár minimální útlum $A = 3$ dB. Pro další snižování útlumu spoje bylo již nutné vypnout interní test pevnosti svařovacího automatu. Postupně byl výboj 1 redukován až na $S_1 = -85$ bit, kde byl dosažen útlum $A = 2,02$ dB. Při realizaci sváru s tímto výkonem se stal svár natolik křehký, že další snižování výkonu výboje nebylo reálné.

Druhou metodou byla metoda svařování se změnou polohy obloukového výboje s více výboji. Použití více výbojů vedlo ke snížení vlivu výbojů na mikrostrukturu při zachování minimální manipulační pevnosti spoje. Proto bylo možné redukovat výkony výbojů, které způsobují kolaps mikrostruktury, více než u první metody a tím dosáhnout menšího útlumu spoje. Touto metodou byl realizován nejnižší útlumu spoje $A = 1,24$ dB.

Třetí a poslední testovanou metodou byla metoda svařování se zvýšeným tlakem plynu v mikrostruktuře. Tato metoda byla nejkomplicovanější, protože bylo třeba vytvořit systém, pomocí kterého se tlakoval plyn do mikrostruktury. Optimalizací této metody bylo dosaženo nejnižších útlumů spoje. Výsledná optimalizace svařovacího procesu snížila útlum spoje na $A = 0,94$ dB.

V závěru práce byl prozkoumán vliv použití tlaku plynu v prvních dvou metodách. U obou metod se tlak plynu projevil pozitivně, snížením útlumu.

Z výsledků měření vlastností PCF-SMF svárů vyplývají hlavní problémy, kterými jsou zachování mikrostruktury a zároveň vytvoření mechanicky pevného spoje. Pro nízko-útlumový svár je tedy nutné obětovat část mechanické pevnosti sváru.

Pro další manipulaci s vláknem je použití zpevňujících ochran po zhotovení sváru nutností. Dále byl zjištěn mezi vlákny stabilní útlum. Tento útlum byl průměru $A_{PRUM} = 1$ dB. Po výměně PCF vlákna za jinou výrobní sérii se snížil na $A_{PRUM} = 0,84$ dB. To bylo způsobeno rozdílným průměrem vidového pole (mode field diameter). Použité PCF vlákno má poměrně velké výrobní tolerance, které způsobují změny ve velikosti MFD. Proto, po optimalizaci svařovacího procesu, nepůsobuje největší útlum svár, ale především vidová nekompatibilita vláken. Pro další snižování útlumu je třeba k vláknu HC 1550-2 najít vhodnější vlákno z řady SMF vláken.

Výsledkem mé práce je doporučení svařovat PCF vlákna se SM vlákny kombinací metod svařování s více výboji a se zvýšeným tlakem v mikrostruktuře. V současnosti je tato metoda využívána pro přípravu optických vláken pro výzkum plynem plněných mikrostrukturních vláken pro frekvenční stabilizaci polovodičových laserů.

LITERATURA

- [1] ZOLLA, Frédéric. *Foundations of photonic crystal fibres*. Hackensack, N.J.: Distributed by World Scientific, c2005, xxxii, 343 p. ISBN 18-609-4507-4.
- [2] JOANNOPOULOS, John D. *Photonic crystals: molding the flow of light*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008, xiv, 286 s. ISBN 978-0-691-12456-8.
- [3] RUSSELL, P. *Photonic Crystal Fibers*. Science [online]. 2003, vol. 299, issue 5605, s. 358-362 [cit. 2014-12-16]. DOI: 10.1126/science.1079280. Dostupné z: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1079280>>.
- [4] HOO, Yeuk L., Wei JIN, Chunzheng SHI, Hoi L. HO, Dong N. WANG a Shuang C. RUAN. *Design and Modeling of a Photonic Crystal Fiber Gas Sensor*. Applied Optics [online]. 2003, vol. 42, issue 18, s. 3509-136 [cit. 2015-02-28]. DOI: 10.1364/ao.42.003509. Dostupné z: <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/6547/1/Hoo_Design_Modeling_Photonic.pdf>.
- [5] JENSEN, Jesper B., Lars H. PEDERSEN, Poul E. HOIBY, Lars B. NIELSEN, T. P. HANSEN, J. R. FOLKENBERG, J. RIISHEDE, Danny NOORDEGRAAF, Kristian NIELSEN, A. CARLSEN a A. BJARKLEV. *Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions*. Optics Letters [online]. 2004, vol. 29, issue 17 [cit. 2015-02-28]. DOI: 10.1364/ol.29.001974. Dostupné z: <http://www.researchgate.net/profile/Anders_Bjarklev/publication/8259240_Photonic_crystal_fiber_based_evanescent-wave_sensor_for_detection_of_biomolecules_in_aqueous_solutions/links/02e7e529fa7f683fb1000000.pdf>.
- [6] BENABID, F., F. COUNY, J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS a P. St J. RUSSELL. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres. Nature [online]. 2005, 434(7032): 488-491 [cit. 2015-05-19]. DOI: 10.1038/nature03349. Dostupné z: <http://lib.fibopt.ru/Articles/Bi/nature_2005_434_488.pdf>.

- [7] HERAEUS *Specialty Fiber Preforms* [online]. 2014 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: http://specialty-fiber.heraeus-quarzglas.com/en/products/silicaforphotoniccrystalfibers/Crystal_Fibers_3780.aspx.
- [8] MARŠÁLEK, Ing. Leoš. TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Optická vlákna [online]. 2006. vyd. Ostrava, 2006* [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf.
- [9] Fiberinstrumentsales: *Fiber Optics How Fiber Optics Are Made?*. [online]. 2014 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.fiberinstrumentsales.com/blog/how-fiber-optics-are-made>.
- [10] RAMSAY, Richard, Sharifeh SHAHI, Jinesh MATHEW, Yuliya SEMENOVA, Gerald FARRELL a Susumu NODA. *Photonic-crystal fiber characteristics benefit numerous applications* [online]. 17.12.2008 [cit. 2015-02-28]. ISSN 10.1117/2.1200811.1371. Dostupné z: <http://spie.org/x31636.xml>.
- [11] Photonic Research Laboratory: *Micro-structured optical fiber*. [online]. 2003 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://grating.kist.re.kr/Teams/grating/eng/research/nano/?ct=making>.
- [12] Thorlabs: *Custom Fiber Optic Patch Cables* [online]. 2014 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de>.
- [13] BÖHME, S., S. FABIAN, T. SCHREIBER, R. EBERHARDT, A. TÜNNERMANN, Krzysztof BORZYCKI a Kay SCHUSTER. End cap splicing of photonic crystal fibers with outstanding quality for high-power applications. In: *Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly VI* [online]. 2012, s. 9 [cit. 2015-02-25]. DOI: 10.5772/35252. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1344712>
- [14] XIAO, Limin, M. S. DEMOKAN, Wei JIN, Yiping WANG a Chun-Liu ZHAO. *Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Conventional Single-Mode Fibers: Microhole Collapse Effect*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2007, vol. 25, issue 11, s. 3563-3574 [cit. 2014-12-16]. DOI:

- 10.1109/jlt.2007.907787. Dostupné z: <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/360/1/microhole-collapse_07.>.
- [15] ZHU, Tao, Fufeng XIAO, Laicai XU, Min LIU, Ming DENG a Kin Seng CHIANG. *Pressure-assisted low-loss fusion splicing between photonic crystal fiber and single-mode fiber*. Optics Express [online]. 2012, vol. 20, issue 22 [cit. 2014-12-17]. DOI: 10.1364/oe.20.024465. Dostupné z: <<http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-22-24465>>.
- [16] JAROSZEWICZ, Leszek R., Michał MURAWSKI, Tomasz NASIŁOWSKI, Karol STASIEWICZ, Paweł MARC, Michał SZYMANSKI, Paweł MERGO, Waław URBANCZYK, Francis BERGHMANS a Hugo THIENPONT. *Low-Loss Patch Cords by Effective Splicing of Various Photonic Crystal Fibers With Standard Single Mode Fiber*. Journal of Lightwave Technology [online]. 2011, vol. 29, issue 19, s. 2940-2946 [cit. 2014-12-17]. DOI: 10.1109/jlt.2011.2163384. Dostupné z: <<http://www.opticsinfobase.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-29-19-2940>>.
- [17] CHEN, Zilun, Xiaoming XI, Wenjing ZHANG, Jing HOU a Zongfu JIANG. *Low-Loss Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Double Cladding Fibers by Controlled Hole Collapse and Tapering*. Journal of Lightwave Technology [online]. 2011, 29(24): 3744-3747 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1109/jlt.2011.2174334. Dostupné z: <<https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-29-24-3744>>
- [18] WANG, Yiping, Hartmut BARTELT, Sven BRUECKNER, Jens KOBELKE, Manfred ROTHHARDT, Klaus MÖRL, Wolfgang ECKE a Reinhardt WILLSCH. *Splicing Ge-doped photonic crystal fibers using commercial fusion splicer with default discharge parameters*. Optics Express [online]. 2008, 16(10) [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1364/oe.16.007258. Dostupné z: <<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-16-10-7258&id=158122>>
- [19] KRISTENSEN, Jesper T., Andreas HOUMANN, Xiaomin LIU a Dmitry TURCHINOVICH. *Low-loss polarization-maintaining fusion splicing of single-mode*

- fibers and hollow-core photonic crystal fibers, relevant for monolithic fiber laser pulse compression. *Optics Express* [online]. 2008, 16(13) [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1364/oe.16.009986. Dostupné z: <<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-16-13-9986&id=164857>>
- [20] ZUOMING, Sun, Song NINGFANG, Jin JING, Song JINGMING a Ma PAN. Low loss fusion splicing polarization-maintaining photonic crystal fiber and conventional polarization-maintaining fiber. *Optical Fiber Technology* [online]. 2012, 18(6): 452-456 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1016/j.yofte.2012.07.007. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520012000788>>
- [21] XIAO, Limin, Wei JIN a M. S. DEMOKAN. *Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges*. *Optics Letters* [online]. 2007, vol. 32, issue 2 [cit. 2014-12-17]. DOI: 10.1364/ol.32.000115. Dostupné z: <<http://www.opticsinfobase.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-32-2-115>>.
- [22] FUJIKURA. *Instruction Manual: Speciality Arc Fusion Splicer FSM-100M/P*. Japan, 2011.
- [23] KUCHARSKI, M a DUBSKÝ, P. *Měření přenosových parametrů optických vláken kabelů a tras*. Praha: Mikrokom, 2000.
- [24] THAPA, R., K. KNABE, K. L. CORWIN a B. R. WASHBURN. *Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells*. *Optics Express* [online]. 2006, 14(21) [cit. 2015-02-19]. DOI: 10.1364/oe.14.009576. Dostupné z: <<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-14-21-9576&id=116356>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SMF	jednomódové optické vlákno – single mode fiber
PCF	mikrostrukturální optické vlákno – photonic crystal fiber
MFD	mode field diametr
ω	mode field diametr
μ	napětí povrchu
γ	viskozita skleněného materiálu
μm	mikrometr
ηm	nanometr
$^{\circ}C$	stupeň celsia
mA	miliampér
s	sekunda
STD	standardní kalibrovaný výboj
bit	jednotka kalibrovaného výboje
DFB	distributed Feedback
A	útlum spoje
P	tlak
S	výkon výboje
G	rozteč vláken
C	posun středu výboje

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

67

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Elektronická verze tohoto dokumentu (soubor Dp.pdf)