



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole

Speciální optická vlákna pro aplikace ve střední infračervené oblasti

Bakalářská práce

Vypracoval: Pavel Šedivý

Vedoucí práce: Ing. Matěj Komanec Ph.D.

Praha, 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šedivý** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **434778**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Speciální optická vlákna pro aplikace ve střední infračervené oblasti

Název bakalářské práce anglicky:

Special Optical Fibers for Mid-infrared Applications

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši týkající se vhodných materiálů (skel) s nízkým měrným útlumem ve střední infračervené oblasti a metod výroby optických vláken z těchto materiálů, včetně analýzy v simulačním prostředí.
2. Zaměřte se na optická vlákna na bázi fluoridů, chalkogenidů a oxidů těžkých kovů. Zabývejte se variantami vlnodné struktury (jádro/plášť a mikrostruktura).
3. Navrhněte měřicí zapojení pro měření pomocí metody vložných ztrát.
4. Provedte experimentální analýzu vybraných vláken, převážně z hlediska měrného útlumu v blízké a střední infračervené oblasti.
5. Zhodnotte dosažené výsledky měření a navrhněte využití zkoumaných vláken pro konkrétní aplikace ve střední infračervené oblasti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Novotný K., Martan T., Šístek J.: Systémy pro optické komunikace. Vydavatelství ČVUT, Praha (2007)
[2] Tao G., Ebendorff-Heidepriem H., Stolyarov A. M., Danto S., Badding J. V., Fink Y., Ballato J., and Abouraddy A. F., 'Infrared fibers,' Adv. Opt. Photon. 7, 379-458 (2015)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **23.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

Pavel Šedivý

Poděkování

Děkuji panu Ing. Matějovi Komancovi Ph.D., vedoucímu mého projektu, za hodnotné rady, důležité připomínky, vstřícný přístup a pomoc při řešení problémů, konzultacích a měření.

ABSTRACT

Tato práce se zabývá optickými vlákny určenými pro střední infračervenou oblast. Úkolem je vybrat určitá vlákna z vhodných optických materiálů, zaměřit se na jejich výrobu a využití. Následným změřením a simulací zjistit vlastnosti daných vláken. Cílem je vyhodnocení výsledků z měření a stanovení oblasti využití pro tyto vlákna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Infračervené záření, optické vlákno, fluoridové sklo, telluričité sklo, chalkogenidové sklo

ABSTRACT

This work deals with optical fibers designed for mid-infrared area. The task is to select certain fibers from suitable optical materials, focus on their fabrication and use. The aim is to evaluate the results from measurements and determine the area of application for these fibers.

KEY WORDS

Infrared radiation, optical fiber, fluoride glass, tellurite glass, chalcogenide glass

OBSAH

ÚVOD	1
TEORETICKÁ ČÁST.....	2
1. Teoretický úvod	2
2. Používané materiály	5
3. Výroba.....	8
3.1. Postup výroby metodou Preform-to-Fiber	8
3.2. Vlákná se skokovou změnou indexu lomu	8
3.3. Rod-in-tube pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu.....	9
3.4. Rod-in-tube odlévání.....	10
3.5. Multi-materiálové vytlačování pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu ..	10
3.6. Mikrostrukturní IR vlákna	11
3.7. Postup výroby metodou Non-Preform-Based (Metoda bez preformy).....	12
4. Optická vlákna na bázi těžkých kovů pro infračervenou oblast	14
4.1. Telluričitá optická vlákna.....	14
4.2. (Olovo-) germaničitá a wolfram-telluričitá optická vlákna	15
5. Fluoridová vlákna.....	16
5.1. ZBLAN skleněná vlákna.....	16
5.2. Fluoroindiová vlákna	17
6. Chalkogenidová IR vlákna.....	19
PRAKTICKÁ ČÁST.....	22
7. Simulace optického vlákna	22
8. Měření optických vláken.....	23
8.1. Měřená vlákna.....	23
8.2 Technologická příprava vláken k měření.....	23
8.3 Postup měření.....	24
8.4. Zdroje a detektory	26
9. Výsledky měření	28

9.1 Vláknó As_2S_3	29
9.2 Vláknó TeO_2	31
9.3 Vláknó As_2Se_3 pro oblast 1000-1700 nm.....	32
10. Aplikační potenciál měřených vláken.....	33
ZÁVĚR.....	34
SEZNAM LITERATURY	35

ÚVOD

Optická technika patří v současné době k velmi rychle se rozvíjejícím oborům. Za posledních několik desítek let prošla velkým rozvojem a zdokonalením. Je možné se s ní setkat v telekomunikační technice, armádě, medicíně, na vědeckých pracovištích nebo průmyslu. V tomto odvětví však stále zůstává poměrně velké pole působnosti pro budoucí vývoj.

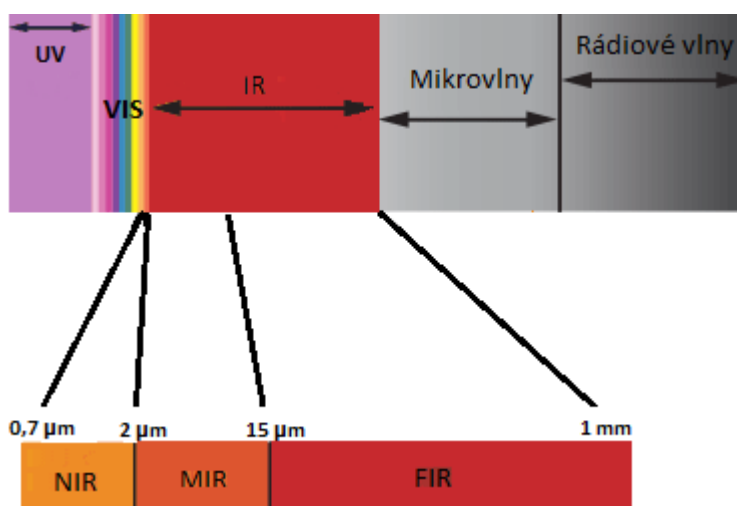
Cílem této bakalářské práce jsou optická vlákna pro střední infračervenou oblast. Práce je zaměřena na teoretický rozbor skelných materiálů vhodných pro výrobu optických vláken vzhledem k nízkému měrnému útlumu, samotnou výrobu vláken a typy vláken v závislosti na materiálu. Dále se práce zaměřuje na experimentální analýzu vybraných vláken a kompenzaci rozdílných konstrukčních parametrů v simulačním prostředí. Podle výsledků měření lze poté odvodit nejlepší možnost pro využití a aplikaci vybraných vláken.

Kapitola 2 je věnována úvodu k optickým vláknům. V kapitole 3 jsou uvedeny skelné materiály, z kterých se mohou optická vlákna pro infračervenou oblast vyrábět. Následující kapitola je věnována výrobě optických vláken, kde jsou vysvětleny jednotlivé postupy výroby. Kapitola 5 má za úkol seznámit čtenáře s optickými vlákny na bázi těžkých kovů, jako jsou telluričitá nebo germaničitá vlákna. Předmětem další kapitoly jsou fluoridová vlákna, kde se zaměřujeme především na vlákna fluoridová. V kapitole 6 jsou popsána chalkogenidová vlákna. Následující kapitola je zaměřena na simulaci vláken v programu BeamProp. Návrh měřicího zapojení je popsán v kapitole 8. Kapitola 9 obsahuje výsledky z měření.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Teoretický úvod

Infračervené (IR) záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo (VIS), ale menší než mikrovlnné záření. IR záření má vlnovou délku mezi 760 nm a 1 mm a je rozděleno (Obr. 1) na jednotlivá pásma, 0,7-2 μm jako blízké-IR (NIR), 2-15 μm jako střední-IR (MIR) a 15 μm až 1 mm jako vzdálené IR (FIR) [1,3]. Pásmo MIR pokrývá atmosférická okna 3-5 μm a 8-12 μm [2], která zahrnují využití například u dálkového snímání, biofotoniky nebo medicíny.



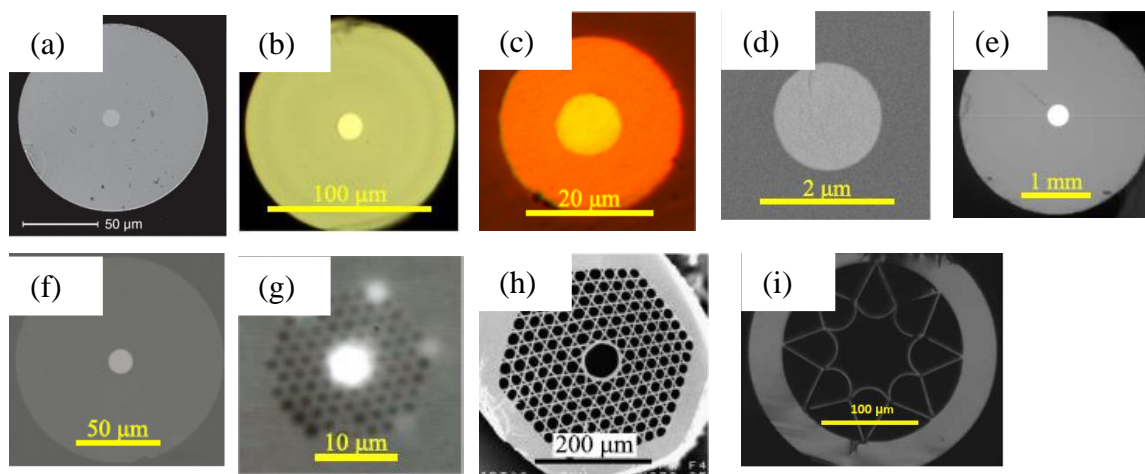
Obrázek 1: Elektromagnetické záření s rozdělením IR pásma na NIR, MIR a FIR

Vzhledem k vývoji a lepší dostupnosti polovodičových MIR zdrojů, se zvětšil zájem o výzkum technologií, které přesahují oblast NIR do oblasti MIR [3].

Infračervená optická vlákna definujeme jako vlákna, která dokáží přenášet záření vlnové délky od 2 do 25 μm . Toto pásmo se rozprostírá po celém pásmu MIR a FIR [3]. První infračervené optické vlákno bylo vyrobeno v druhé polovině šedesátých let 20. století. Tímto vyrobeným vláknem bylo chalkogenidové (CHG) vlákno vyrobené z arsenu-sulfidu (As_2S_3). První vlákno vykazovalo vysoký útlum (>10 dB/m při vlnové délce 2-8 μm) a nízkou mechanickou odolnost. Postupným zdokonalováním bylo dosaženo kvalitních vláken, s mnohem lepšími vlastnostmi, a díky tomu se může stále rozšiřovat jejich oblast využití. [4].

Pro vlákna využívaná v oblasti VIS a NIR je použito jen malé množství skelných materiálů, naopak pro pásma MIR a FIR se využívá velké množství skelných materiálů, jako jsou chalkogenidy, telluricitany, nebo fluoridy. V poslední době se pro výrobu začaly používat materiály jako je křemík nebo germanium, tedy materiály, které se využívají pro oblast VIS a NIR. Mechanické a optické nedostatky IR vláken mohou řešit vícemateriálová vlákna [3]. Optická IR vlákna jsou rozdělena do tří základních kategorií: skleněné, krystalické a vlákna se vzduchovým vedením vlny [4].

Pomocí IR optických vláken je možno přenášet vlnové délky větší než pomocí klasického křemenného optického vlákna, které se v této práci nepovažuje za IR vlákno, jelikož jeho přenosová charakteristika nezasahuje do MIR pásma. V porovnání s klasickými křemennými vlákny mají IR vlákna horší optické a mechanické vlastnosti. Většina IR vláken vykazuje útlum v jednotkách dB/m, proto se především používají pro přenos na krátké vzdálenosti, což je postačující pro aplikace v chemickém snímání, termometrii, nebo přenosu vysokých výkonů v MIR oblasti [3].



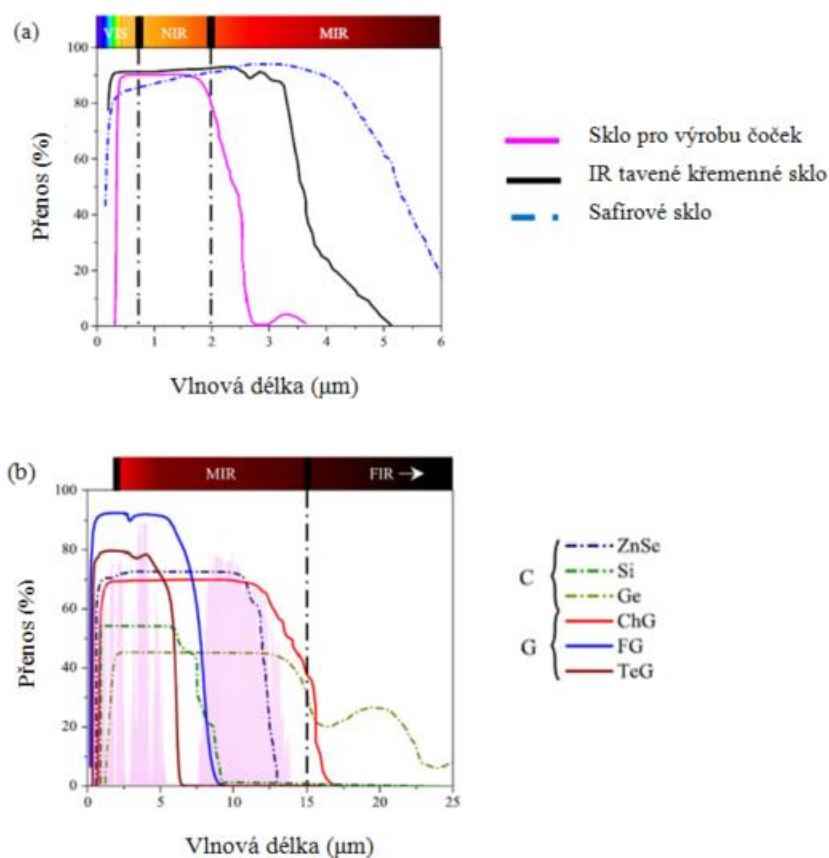
Obrázek 2: Vlákna se skokovou změnou indexu lomu (a)-(b). (a) Fluoridové vlákno [5], (b) Telluritové vlákno [6], Hybridní IR vlákna (c)-(d). (c) ChG vlákno s pláštěm z polymeru [3], (d) ChG vlákno s křemenným opláštěním [3], Krystalická IR vlákna (e)-(f). (e) InSb jádro, boro-křemenné opláštění [3] (f) ZnSe jádro, křemenný plášť [3], Solid-core IR optická vlákna (g) ChG PCF [3], IR optická vlákna s dutým jádrem (h)-(g). (h) Vlákno s dutým jádrem ChG PBG vlákno [3], (i) Vlákno se vzduchovým vedením vlny s negativním zakřivením [7]

Obrázek 2 názorně ukazuje, jak různorodá mohou být IR vlákna. Je zde uveden příklad 9 možných typů vláken. První třídou na obrázcích (a)-(b) jsou vlákna se skokovou změnou indexu lomu, kde jádro i plášť jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Tento typ vláken se komerčně vyrábí. Druhou třídou na obrázcích (c)-(d) zastupují nedávno vyvinutá hybridní vlákna, kde jádro je vyrobeno z jiného materiálu než plášť. Důvod zavedení je zlepšení mechanických a optických vlastností vlákna. Třetí třídou (e)-(f) jsou krystalická vlákna, mezi které patří na-

příklad vlákna ZnSe. Čtvrtou třídou (g) jsou solid-core IR optická vlákna (PCFs). Jako poslední na obrázku jsou optická IR vlákna s dutým jádrem (h)-(i) [3].

2. Používané materiály

Optická vlákna jsou vyráběna především ze sklovitých materiálů, jako jsou anorganická skla. Křemenná optická vlákna mají dobrý optický přenos v oblasti NIR, ale již nejsou vhodná pro přenos v oblasti MIR. Z tohoto důvodu je důležité brát v úvahu i jiné materiály (viz. obrázek 3(b)). V posledních letech ale přichází začleňování křemíkových vláken do hybridních vícemateriálových vláken, která kombinují krystalické a skelné komponenty a nabízejí tím více možností pro využití [3,9].



Obrázek 3: Spektrální charakteristika pro skelné (G) a krystalické (C) IR materiály [3]. (a) Skelné materiály pro přenos z VIS do MIR (tloušťka materiálu v závorce): Sklo pro výrobu čoček (10mm), křemenné sklo (1 mm), safír (3 mm). (b) IR materiály pro přenos z MIR do FIR (tloušťka materiálu v závorce): ZnSe (3 mm), Si (6 mm), Ge (1 mm), As₂S₃ (CHG, 10 mm), ZBLAN sklo (FG, 2 mm) a telluričité sklo (TEG, 2 mm)

Na obr. 3 (a) jsou porovnávány tři materiály: sklo pro výrobu čoček, křemenné sklo a safírové sklo. Sklo, ze kterého se vyrábějí čočky, propouští světlo jen do 2 μm . Tradičně využívaná jednojádřivá vlákna oxidu křemičitého zajišťují přenos s nízkým útlumem okolo 0,5dB/ km na 1310 nm [8]. Zajímavým materiálem používaným pro optická vlákna je krysta-

lický safír. Předností tohoto materiálu je jeho tvrdost a tím i odolnost vůči poškrábání. Proto, aby bylo možné krystalický safír brousit nebo řezat, musí být použity diamantové nástroje [9]. Přenos safírového skla je od UV do MIR (0.17-5.5 μm). Jelikož safír je krystalický materiál, nemůže být přímo tepelně tažen. Hlavní nevýhodou safíru, jako materiálu určeného pro optická vlákna, je obtížné určení tepelně kompatibilního skelného opláštění materiál [3].

Na obr. 3 (b) porovnáváme materiály, které přenášejí světlo dál do oblasti MIR a na obr. 4 jsou znázorněny přibližné ztráty pro daná vlákna v závislosti na vlnové délce. Infračervená skla mohou být obecně rozdělena do tří skupin: oxidy těžkých kovů, halogenidy (fluoridy a chloridy), a chalkogenidy. Nejpoužívanější IR skla na bázi oxidů těžkých kovů jsou telluričitá a (olovo-) germaničitá skla [3].

Materiál	n 1,55 μm	n_2/n_2 (SiO ₂) 1,55 μm	Toxicita	Transparence (μm)	
				Sklo	Vlákno
Křemík	1,44	1	Bezpečné	0,2-3,5	0,3-2,1
ZBLAN FG	1,49	1,2	Vysoká	0,3-7,5	0,5-5,5
Telluričité sklo	2,03	19	Bezpečné	0,4-5,5	0,5-4,5
As ₂ S ₃ ChG	2,5	200	Vysoká	0,6-12	1,0-6,0
As ₂ Se ₃ ChG	2,9	600	Vysoká	1,0-15	1,5-9,0
Te- ChG	3,2 (2 μm)	1000 (MIR)	Mírná	1,5-20	2,0-12

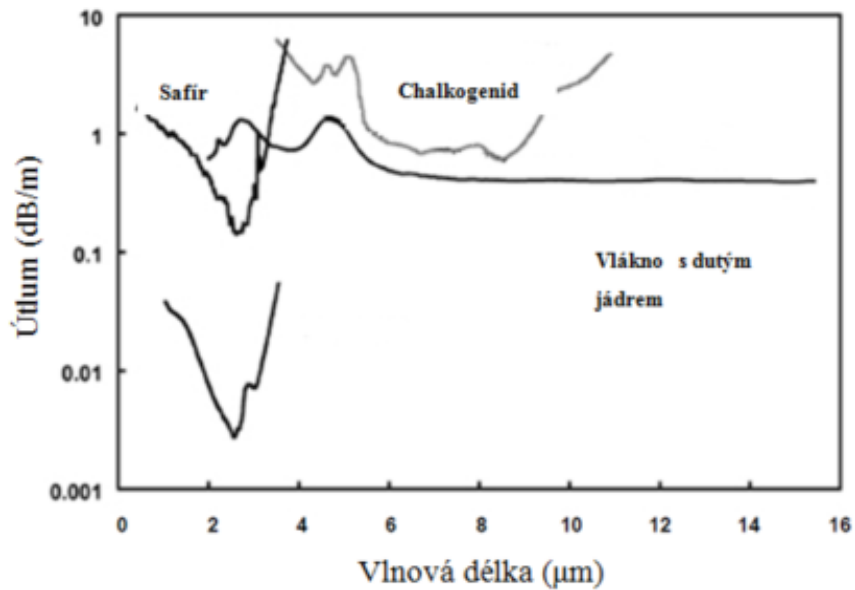
Tabulka 1: Optické parametry pro určité optické materiály. Index lomu: n, Nelineární index lomu: n_2

Telluričitá skla mají slibné uplatnění jako nelineární vlákna vzhledem ke své vysoké optické nelinearitě a nízkým ztrátám okolo 0,8 dB/m na 2 μm . Jejich přenosová okna jsou od 0,4 do 5,5 μm . Tyto slibné vlastnosti vedly ke komercializaci IR telluričitých vláken [15].

Fluoridová skla, včetně skel ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF), tvoří jednu třídu bez-oxidových optických skel složených z fluoridů různých kovů. Typické fluoridové sklo má nižší tepelnou a chemickou stabilitu než jiná IR skla, ale má širší přenosové okno ve srovnání s oxidovými skly [3,5].

Chalkogenidová skla (CHG) našla velké uplatnění v nelineární optice, využívají se u čidel a jako optická vlákna. Hlavním způsobem výroby tohoto typu vláken pro komerční využití je metoda dvou kelímků. Optická vlákna jsou založena na síře, která přenáší od 0,6 do 12 μm , selenu (1-15 μm) a teluru (1,5-20 μm) [3,9].

ZnSe propouští světlo z VIS do FIR (do 21,5 μm pro 1 mm silné vzorky a u vzorků 12 mm propouští do 14 μm). Využití našlo především v optických komponentech (např. čočky) nebo pro IR lasery [3,10].



Obrázek 4: Útlum pro některé z běžných vláknových IR materiálů [4]: ZBLAN fluoridové sklo, Safir, Chalkogenidové sklo, Vláknó s dutým jádrem.

3. Výroba

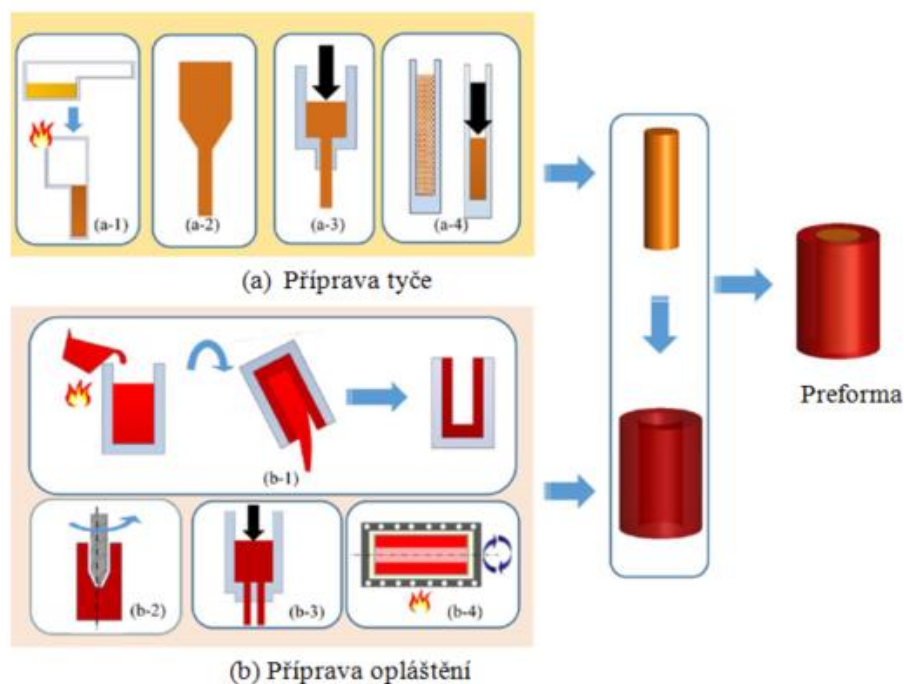
Pro výrobu křemenných optických vláken se využívá dvou základních metod a to modifikovaná chemická depozice z plynného stavu- MCVD (modified chemical vapor deposition) pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu (step-index) a stack-and-draw pro mikrostrukturální optická vlákna. To, že se IR optická vlákna vyrábějí z celé řady materiálů s různými termomechanickými vlastnostmi, vede k zavedení rozdílných postupů při výrobě. Výroba IR vláken je rozdělena na Preform-to-fiber a Non-Preform-base. Pro Preform-to-fiber při postupu výroby IR vláken se vychází z úpravy makroskopické preformy, zatímco u Non-Preform-based je vlákno vyrobeno přímo z taveniny. Ve výrobě IR vláken jsou dvě hlavní technologické překážky, a to dosažení nízkých optických ztrát a dosažení vysoké mechanické pevnosti a odolnosti. Optické ztráty vychází z nedokonalostí ve strukturách vláken při výrobě [3]. Krystalické materiály, používající se pro výrobu optických vláken, jsou z velké části velice křehké a tím i málo odolné [3,9].

3.1. Postup výroby metodou Preform-to-Fiber

Tento postup výroby je podobný výrobě křemenných optických vláken. Makroskopickou preformu pomocí tepla zmenšujeme a natahujeme. Polotovar se vkládá do pece, kde dochází ke změkčení materiálu, za pomoci gravitace nebo vnější síly se materiál natahuje do tenkého vlákna. Pro ochranu vlákna se na vlákno nanáší polymerní povlak. Jeden z alternativních přístupů k nanesení je, že se polymerní ochrana nanáší společně s tažením vlákna. Je požadováno, aby byl polymer kompatibilní s termomechanickými materiály vláken [3].

3.2. Vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Nejvíce využívaný způsob výroby se nazývá “rod-in-tube” (tyč v trubce). Vlákno je vyrobeno natažením jádra zasunutého v trubce z materiálu pláště [11]. Celý postup výroby je na obrázku 5. Prvním krokem pro vytvoření preformy je výroba tyče (jádra) s vyšším indexem lomu a následná výroba trubky (pláště) s nižším indexem lomu. Po vložení tyče do trubky vzniká preforma. [3]



Obrázek 5: Metoda rod-in-tube. (a) výroba tyče metodou (a-1) odléváním, (a-2) tepelným tažením, (a-3) vytlačováním, (a-4) tepelný stisk z prášku (hot press). (b) příprava opláštění (trubky). (b-1) litím, (b-2) vrtáním, (b-3) vytlačováním, (b-4) rotačním odléváním. Po vytvoření obou částí se složením tyče do trubky vytvoří preforma [3].

Libovolné kombinace tyčí a trubek pro výrobu preformy nejsou možné. Každé konkrétní jádro a opláštění má jen několik možností, které vyhovuje daným parametrům. Například metoda odlévání není vhodná pro krystalické materiály. Pro případ, že bychom neměli jádro ve formě tyče, je jedinou možností využít metodu tepelného stisku. Metoda lití není vhodná pro toxické látky nebo skla s vysokým tlakem par v kapalném stavu. U těchto materiálů může dojít k odpaření komponent a tím dojít ke změně složení skla, což by vedlo ke změně indexu lomu [3].

3.3. Rod-in-tube pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Proto, aby mohla být vytvořena preforma, musí být nejdříve vytvořeno jádro. Na obrázku 5 je výroba jádra pomocí čtyř metod. První z metod je metoda *odlívání* (a-1). Surový materiál je taven v uzavřené nádobě. Odlévána mohou být skoro všechna měkká skla včetně telluričitanů, fluoridů a chalkogenidových skel. Druhá metoda je *tepelné tažení* (a-2). Materiál může být tažen tak dlouho, dokud nedojde k výraznému snížení čistoty materiálu. Třetí uvedená metoda pro výrobu jádra je *vytlačování* (a-3). Sypký materiál je vložen do pouzdra, kde se zahřívá do doby, než materiál změkne a následně je tlačeno skrz formu

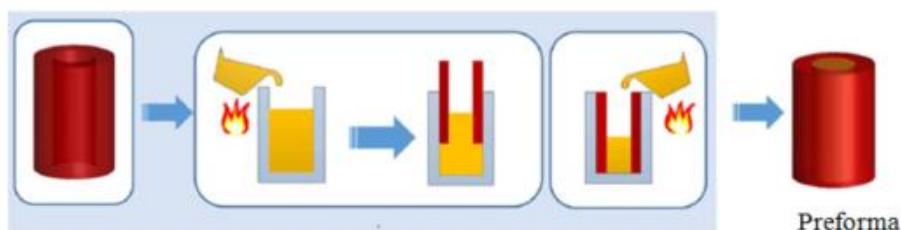
o daném rozměru. Čtvrtá metoda je **lisování za tepla (a-4)**. Základem je prášková surovina, která je pod vysokým tlakem a za vhodné teploty slisována do tyče [3].

Druhým komponentem pro vytvoření preformy je trubka. Jako první je na obrázku 5 uvedena metoda **odlévání (b-1)**. Horké sklo se nalije do formy, která má nízkou teplotu. Sklo u formy zatvrdne a vnitřní tekuté sklo se vylévá. Po obrábění a leštění je získána požadovaná sklená trubka. Další uvedenou metodou je **vrtání (b-2)**. Pro vrtání mohou být zvoleny různé techniky, buď mechanicky, nebo ultrazvukově. Tato metoda se využívá pro většinu IR skel. **Vytlačování (b-3)** je metoda na stejném principu jako vytlačování tyče. Poslední uvedenou metodou je **rotační odlévání (b-4)**. Rotačním odléváním se vyrábí trubky z telluričitanu, fluo-ridu a chalkogenidového skla. Nádoba je otáčena vysokou rychlostí a pomocí odstředivé síly se vytváří skleněná trubice [3].

Po vytvoření obou komponentů, je tyč vložena do trubky. Výsledkem je preforma pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu.

3.4. Rod-in-tube odlévání

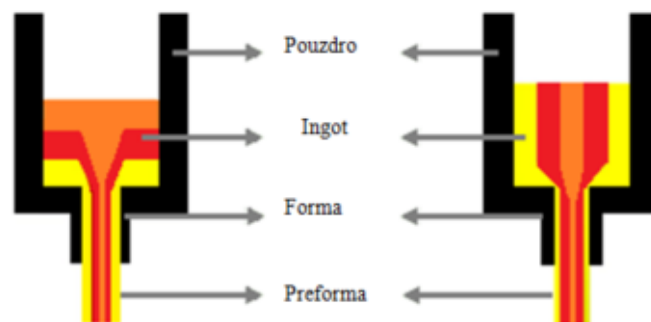
Metoda je založena na principu, že do připravené trubky odlijeme materiál pro tyč. Na obrázku 6 jsou naznačeny dvě možnosti výroby. Buď je vložena trubice do jádrové kapaliny, nebo jádrovou kapalinu nalijeme do trubice. [3]



Obrázek 6: Metoda odlévání [3].

3.5. Multi-materiálové vytlačování pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Princip výroby je naznačen na obrázku 7, kdy z formy vychází v jednom kroku již hotová preforma. Tato metoda je vhodná pro chalkogenidová skla [12].

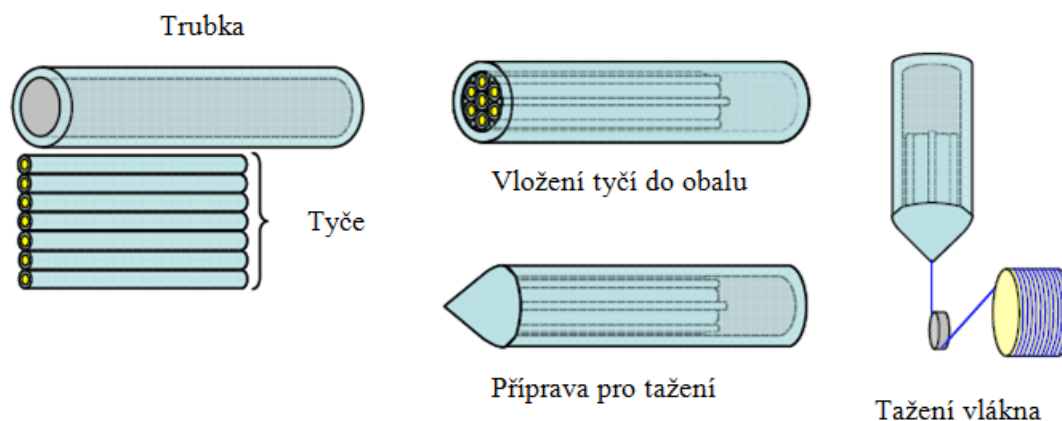


Obrázek 7: Vytlačování více materiálů.

3.6. Mikrostrukturní IR vlákna

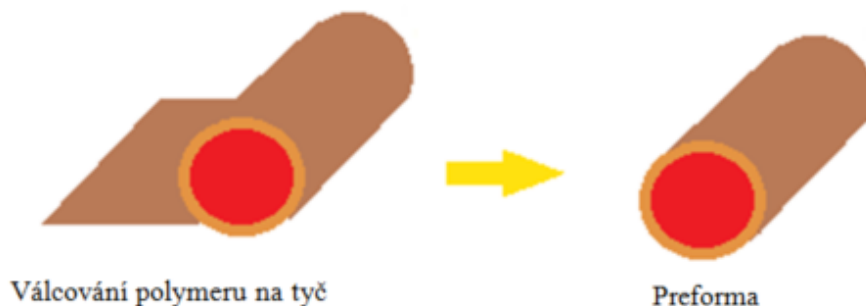
Mikrostrukturní vlákna umožňují velkou míru volnosti při návrhu parametrů vláken prostřednictvím konstrukčního řešení při konstrukci vlákna z jednoho materiálu vytvořením vzduchových otvorů v plášti. Unikátní aspekt v IR oblasti je velké rozpětí indexů lomu IR skel [3].

Obrázek 8 schematicky znázorňuje výrobu stack-and-draw. V prvním kroku se trubky a tyče čistí a suší. Dalším krokem je naskládání tyčí do trubky. Vlákna vyrobená touto metodou jsou obtížnější na výrobu, než metodou vrtání, ale za to je jejich kvalita vyšší [13].



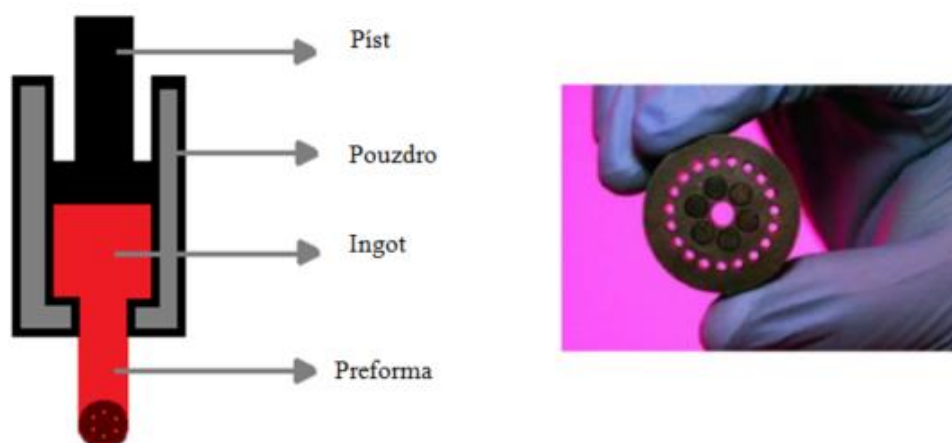
Obrázek 8: Stack-and-draw [13].

Metoda **tenkovrstvé válcování**. Unikátní proces zahrnuje válcování tenké polymerní fólie kolem tyče (Obr.9). Polymerní fólie může být nahrazena dvouvrstvou fólií, což vede k 1D vícevrstvé struktuře [3].



Obrázek 9: Tenkovrstvé válcování

Vytlačování. Vytlačování se používá k zhotovování preforem mikrostrukturálních vláken z měkkého skla. Ve srovnání s metodou stack-a-draw, vrtáním a litím, vytlačování zahrnuje pouze jediný krok pro vytvoření preformy [3].



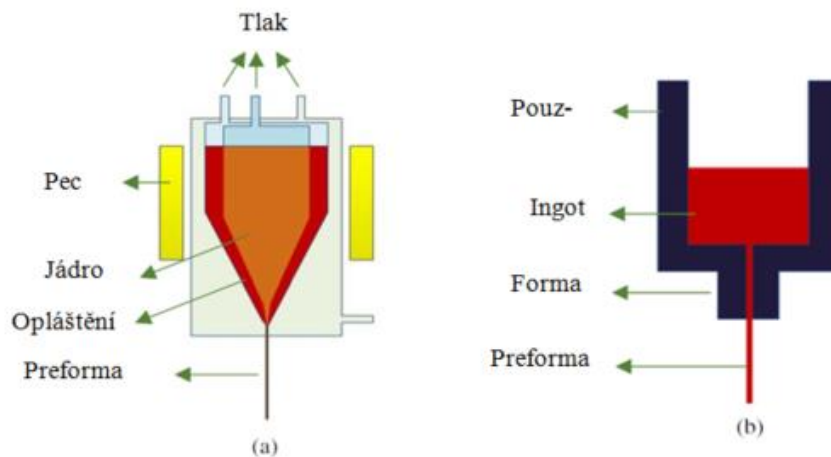
Obrázek 10: (a) Vytváření IR preformy pro mikrostrukturální vlákno pomocí metody vytlačování. (b) Vytlačovací hlava [3].

3.7. Postup výroby metodou Non-Preform-Based (Metoda bez preformy)

Tento způsob výroby se ukázal být dobrý pro výrobu velice kvalitních IR vláken (zpočátku fluoridových skel a následně i chalkogenidových skel) Pomocí této metody můžeme vytvořit jednovidová i mnohovidová vlákna. Tato metoda je založena na principu dvojitého tavícího kelímku, který je zobrazen na obr. 11. Systém dvou kelímků je sestaven z vnitřního křemenného kelímku soustředně umístěného uvnitř vnějšího křemenného kelímku, přičemž každý je připojen jednotlivě na inertní zdroj plynu. Materiál jádra a pláště se roztaví ve vnitřním a vnějším kelímku za pomoci pece. Roztavená skla se táhnou skrz trysku a tím vzniká

vlákno, na které se nanáší ochranné povlaky, a následně je navíjeno na navíjecí buben. Poměr jádro/plášť určuje tlak plynu ve vnitřním a vnějším kelímku, rychlost vytahování, nebo nastavení teploty [3,14].

Kvalita takto vyrobených vláken je větší než kvalita vláken vyrobených jinou metodou. Nevýhodou této metody je, že výroba není tolik pod kontrolou jako např. u metody vytváření z preformy, u které můžeme lépe kontrolovat jak strukturu, tak i rozměry vlákna [3].



Obrázek 11: Výroba vláken na principu bez preformy [3]: (a) Metoda dvou kelímků, (b) Tepelné natahování

4. Optická vlákna na bázi těžkých kovů pro infračervenou oblast

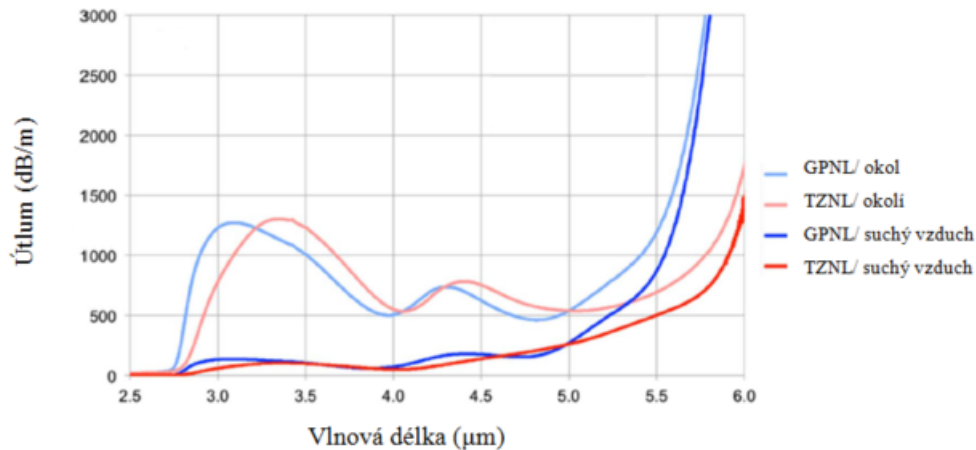
Optická vlákna na bázi oxidu kovů (HMOGs) mají přenosová okna, která sahají od VIS do MIR (0,7-15 μm). Mezi tento typ vláken patří vlákna, jako jsou germanicitá, olovo-křemíková a telluricitá. Tato skla mají lepší mechanické a tepelné vlastnosti a mají vyšší optické nelineární koeficienty než fluoridová skla (viz. tabulka 1). Ve srovnání s chalkogenidovými skly mají nižší nelinearitu a kratší mezní vlnovou délku (tzv. cut-off). Nejběžnější oxidová skla vychází z křemičitanů, která nejsou užitečná pro přenos v IR oblasti. Vymění-li se u takovýchto vláken křemík za těžký kov, jako olovo nebo wolfram, docílí se tím IR oblasti. V porovnání s fluoridovými a chalkogenidovými skly, tak tato skla zasahují dál do IR oblasti. Vlákna vyrobená z těchto materiálů jsou dnes již hojně komerčně používána a využívají se například pro laserovou aplikaci [3,4].

4.1. Telluricitá optická vlákna

Oxid telluricitý (TeO_2) je bílá pevná látka vyskytující se v přírodě jako minerál slouží jako hlavní materiál pro výrobu TeO_2 optických vláken. První významný objev optických vlastností telluricitých vláken byl zaznamenán v roce 1994 [3]. Telluricitá vlákna mají přenosová okna, která sahají z VIS do MIR (0,7-5,5 μm). Z různých typů skel, telluricitá vlákna jsou využívána vzhledem k velmi velké optické nelinearitě a díky tomu, že mohou být snadno tvarována vzhledem ke své vysoké krystalizační stabilitě. Pro tvarování je využito techniky lití, vrtání i vytlačování. Klíčem k získání dobrého vnitřního přenosu pro oblast MIR u telluricitého skla je redukce O-H (hydroxylových) skupin, které způsobují silnou absorpci na 2,8-4,0 μm z důvodu nečistot v surovinách [3,15]. Snížení množství O-H v telluricitém skle bylo testováno pomocí několika metod, jako je metoda tavení v suché atmosféře, dehydratace surového materiálu, použití fluoridu a chloridu a jejich kombinací. Aplikací suché atmosféry uvolníme vodu z taveniny do atmosféry a tím se sníží O-H. Na obrázku 12 je vidět znatelný rozdíl ztrát mezi vzorky důvodem rozdílného prostředí. Doba a teplota tavení je ale omezena z důvodu, aby se zabránilo značnému odpařování skleněné taveniny [3].

Fluoro-telluricitá skla vykazují sníženou krystalizační stálost a mají nižší lineární a nelineární indexy lomu, které jsou nežádoucí pro využití v nelineárních aplikacích. Použití fluoridu snižuje teplotu skelného přechodu a tím i mechanickou a teplotní stabilitu. Na rozdíl od O-H skupin, kovové nečistoty, způsobují absorpci a tím i zvýšené ztráty. Tento

efekt je zvláště významný pro oblast NIR, kde absorpce vzhledem k O-H skupinám, je významně nižší ve srovnání s oblastí MIR [3].



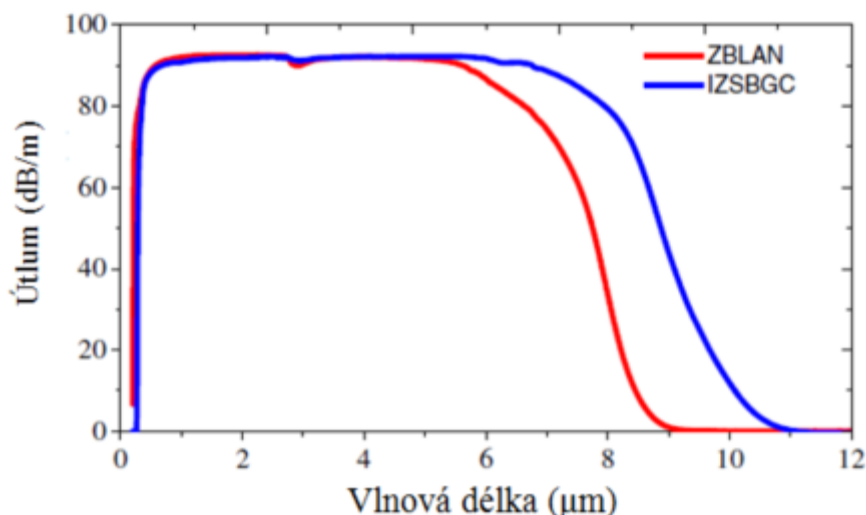
Obrázek 12: Absorpční spektra [3]: sodná-zinko-telluričitová (TZNL) a olovo germaničitá (GPLN) skla v roztaženém prostředí a v suché atmosféře.

4.2. (Olovo-) germaničitá a wolfram-telluričitá optická vlákna

Germaničitá skleněná vlákna obecně neobsahují fluoridové sloučeniny ani oxid křemičitý (SiO_2), ale obsahují oxidy těžkých kovů. Díky tomu se posouvá možnost zasahovat dál do IR vlnových délek. (Olovo-) germaničitá a wolfram-telluričitá skla nabízejí IR přenos až do 4 μm , jejich nelinearita není tak vysoká jako u telluričitého skla, ale vyznačují se vyšší mechanickou stabilitou. Nová olovo-germaničitá skla jsou vhodná pro infračervený přenos především díky své vysoké nelinearitě a vysokému zisku. Další výhodou germaničitých vláken na rozdíl od fluoridových vláken je, že germaničité sklo má vyšší teplotu skelného přechodu. V poslední době se tato vlákna jako alternativa na ChGs vlákna pro 3 μm rozvody výkonových laserů. Přenosové ztráty jsou řádově 0,2 dB/m a je možné přenášet laserové paprsky s více než 10 W optické energie prostřednictvím multimodových vláken [3,16].

5. Fluoridová vlákna

Fluoridová skla v oblasti 2-5 μm jsou nejslibnějšími materiály pro přenos, mají nejmenší index lomu mezi IR vlákny a tím i nejnižší optickou nelinearitu. Jsou proto velice vhodné pro přenášení velkých výkonů a využití pro lasery, kde jsou nelineární efekty nežádoucí. Jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují nízké optické ztráty. Z tohoto důvodu se fluoridová skla využívají pro vláknové lasery v rozmezí 3-5 μm . Nevýhodou fluoridových skel je jejich špatná chemická stabilita. V porovnání s chalkogenidovým sklem vykazuje nižší stabilitu krystalizace. Fluoridová skla nabízí širší IR přenos z důvodu jejich nižší fononové energie. Rozdělujeme je do čtyř kategorií: fluoro-aluminiová skla na bázi AlF_3 , fluoro-zirkoničitá skla na bázi ZrF_4 , fluoro-indate skla na bázi InF_3 a fluoridová skla na základě dvojmocných fluoridů. K nejvíce dnes využívaným řadíme skla fluoro-zirkonová [3,4,17].



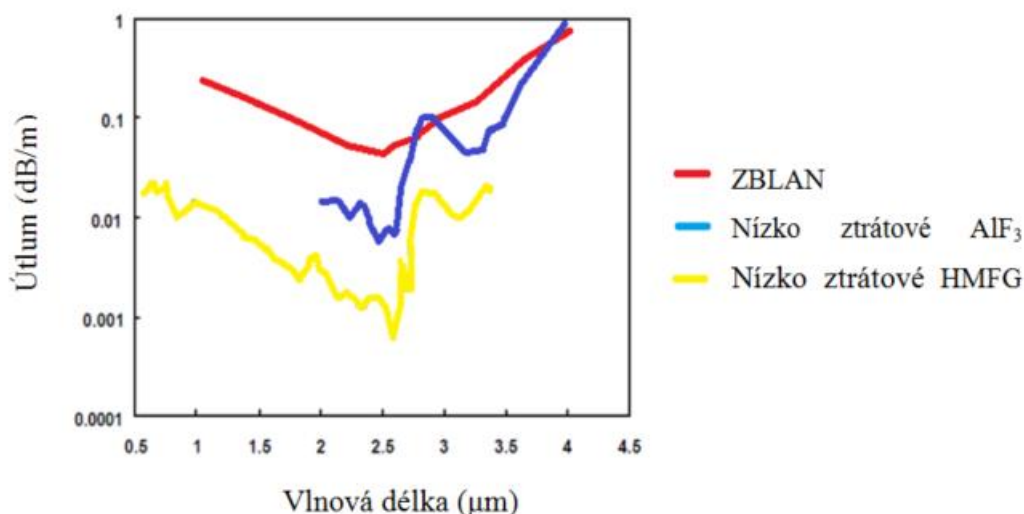
Obrázek 13: Spektra typického ZrF_4 na bázi fluoridu (ZBLAN) a InF_3 na bázi fluoridu

Fluoro-zirkonová skla (ZrF_4) jsou ve stejné kategorii vláken jako vlákna ZBLAN. Vlákno ZBLAN vykazuje vysokou stabilitu krystalizace, což umožňuje výrobu nízkoztrátového vlákna [3].

5.1. ZBLAN skleněná vlákna

Většina fluoridových skel má přenosové okno od UV (0,25 μm) do MIR (6-8 μm). Pro fluoro-zirkonová skla bylo zjištěno, že teoretické útlumy jsou $<0,01$ dB/km na 2-3 μm , tedy o řád nižší než u oxidu křemičitého. Během let 1980-1990 se vývoj fluoro-

vých skel rychle rozvíjel. Nejnižší prokázaná hodnota byla 0,7 dB/ km na 2,7 μm . Vzhledem k malým ztrátám se hned začalo uvažovat o nízkoztrátovém vlákně pro komunikační linky. Nižší hodnoty nebylo dosaženo v důsledku ztrát způsobených nečistotami a rozptylu ve skle. Proto, aby bylo dosaženo co nejmenších ztrát, musí být použity vysoce čisté materiály. Komerčně dostupná jsou vlákna fluoro-zirkoničitá se skokovou změnou lomu, které mají útlum 5-50 dB/m pro 2-3 μm . ZBLAN skleněná vlákna našla široké rozšíření ve vláknových lasech, díky nízké nelinearitě a nízkým ztrátám [3,5]. Další využití ZBLAN vlákna našla v oblasti infračervené spektroskopie a zesilovačích optického signálu [22].



Obrázek 14: Závislost útlumu na vlnové délce pro ZBLAN a AlF_3 HMFG (fluoridové) [4].

5.2. Fluoroindiová vlákna

Fluoroindiová skla nabízejí velmi dobrou optickou kvalitu, stabilitu vůči vlhkosti vzduchu a vykazují nízký optický útlum [18]. Tento typ vláken se vyznačuje vyšší teplotou T_g (skelného přechodu) $T_g \sim 300^\circ\text{C}$, zatímco vlákna ZBLAN $\sim 260^\circ\text{C}$ a díky tomu je zajištěna vyšší teplotní stabilita. U dnešních komerčně dostupných fluoroindiových vláken se skokovou změnou indexu lomu může být dosaženo nízkého útlumu 0,6 dB/ m při 5 μm . Pro porovnání je při této vlnové délce, teoretický útlum ZBLAN vlákna 6 dB/ m [3].

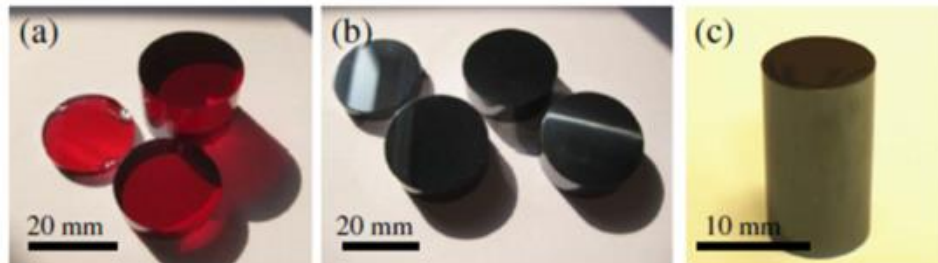
Původní myšlenka pro využití fluoridových vláken byla oblast komunikace. Vycházelo se z poznatku, že by ztráty mohly být menší, než u vláken z oxidu křemičitého, které je průhledné jen do 2 μm . Avšak tak nízké ztráty nebyly nikdy dosaženy a spolu s cenou a křehkostí fluoridových vláken nedošlo ke komercializaci v této oblasti. Uplatnění tento typ vláken našel v oblasti spektroskopie, optických senzorů, termometrie a zobrazování. Další možností uplat-

nění je medicína, kde se vlákna používají k přepravě světla pro lasery využívané např. v oftalmologii nebo stomatologii. Problémy s fluoridovými vlákny spočívají v drahém a obtížném zpracování kvůli jejich křehkosti a (částečně) omezené chemické stabilitě [23].

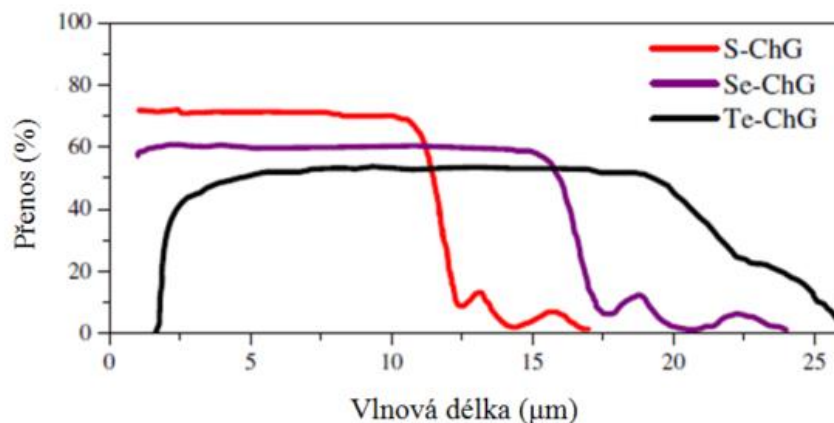
6. Chalkogenidová IR vlákna

Chalkogeny jsou chemické prvky ve skupině VI.A periodické tabulky prvků, konkrétně jsou to prvky síra (S), selen (Se) a telur (Te), které jsou vidět na obrázku 15. Chalkogenidové sklo (CHGs) na sebe poukázalo především v poslední době, přestože jeho vlastnosti byly objeveny už v roce 1955. Jednou z dobrých vlastností CHGs vláken je široká IR transparentnost jdoucí až k FIR přes dvě atmosférická okna v oblasti MIR (3-5 μ m a 8-12 μ m), která je zobrazena na obrázku 16, další pozitivní vlastností je snadná tepelná výroba. Pozoruhodná vlastnost chalkogenidových skel je jejich silná optická nelinearita. V závislosti na složení může být nelineární koeficient 100-1000 krát větší než u křemenného skla. Nejčastěji komerčně vyráběná vlákna jsou na základě složení As-S (Se), GE-As-Se (Te), As-Se-Te, Ga-la-S a Ge-Sb-Se [2,3].

Skelné vzorky o tloušťce jednoho milimetru umožňují přenášet světlo v S- (0,5-12 μ m), SE- (1–16 μ m), a Te- (1,5-20 μ m) spektrálního okna, jak je názorně znázorněno na obrázku 15 [3].

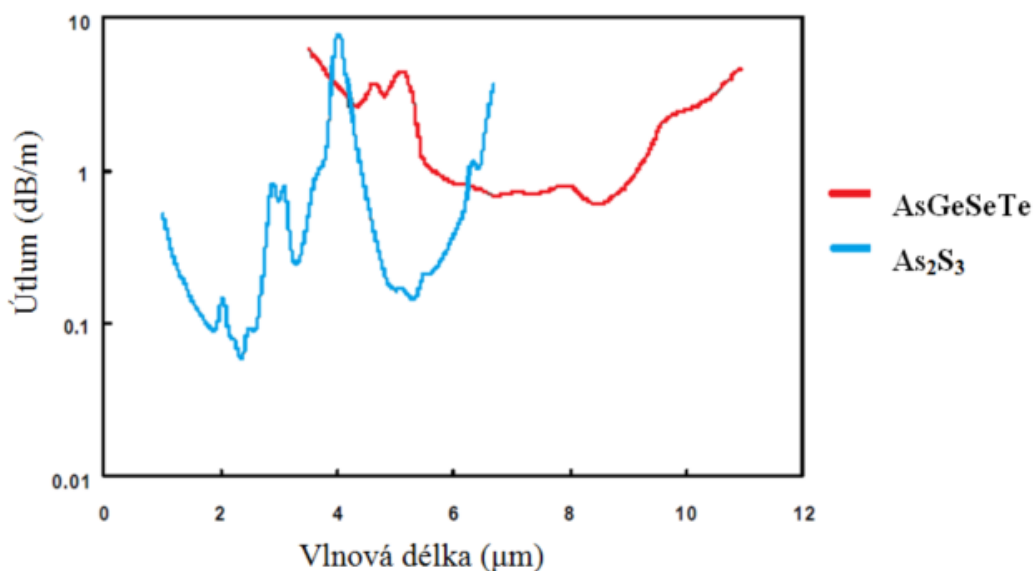


Obrázek 15: (a)-(c) Vzorky typických materiálů pro chalkogenidová IR vlákna, síra (S), selen (Se) a telur (Te). (a) As_2S_3 , (b) As_2Se_3 , and (c) $Ge_{20}As_{20}Te_{45}Se_{15}$ [3].



Obrázek 16: Přenos chalkogenidových vláken [3].

Optický útlum ve ChG vláknech se pohybuje v rozmezí 0,1-10 dB/m. Na obrázku 17 je znázorněna závislost ztrát na vlnové délce pro arsen-sulfidové vlákno (As_2S_3) a chalkogenidové vlákno AsGeSeTe . Doposud nebylo dosaženo teoretických hodnot, které mají být mnohem nižší, než hodnoty změřené. Tyto hodnoty přepokládají pro GeS_3 minimální útlum 11 dB/m na 4,5 μm a pro vlákno As_2S_3 hodnotu 0,01 dB/m na 5,0 μm . Zatím tedy ještě nebyl plně využit potenciál těchto typů vláken [3,4].



Obrázek 17: Závislosti útlumu na vlnové délce dvou běžně dostupných chalkogenidových vláken [4].

CHG se zpravidla připravují z prvků a materiálů o velmi vysoké čistotě [19]. Každý materiál má jinou teplotu tání a vykazuje rozdílný tlak par při tavení [3]. Spojení více látek musí být prováděno ve vakuových křemenných kapslích, z důvodu zabránění vniknutí nečistot do taveniny. Kdyby se nečistoty dostaly do vlákna, vedlo by to k velké absorpci, nebo dokonce i k neprůhlednosti [20]. Látky, které nejvíce znečišťují vlákno, jsou dohledatelné hned ve výchozích materiálech pro výrobu. Zlepšení vlastností CHG vláken docílíme například použitím netěkavých látek. Využitím těchto látek, dosáhneme nižšího vstupu nečistot a spojení látek za nižší teploty [3].

Útlumy v GhG vláknech jsou odhadovány na 0,08 dB / km při 5,0 a 6,1 μm pro As-S a As-GeSeTe skleněná vlákna. Při eliminaci nečistot se vědci dostali ke snížení útlumu ve vláknech z As-S , As-GeSeTe , a As-S-GeSeTe na <1 dB/m. Nejnižší výsledek pro CHG na bázi optických vláken bylo dosaženo v As_2S_3 optických vláknech, s útlumem ve výši 0,012 a 0,014 dB / m při 3,0 a 4,8 μm [3].

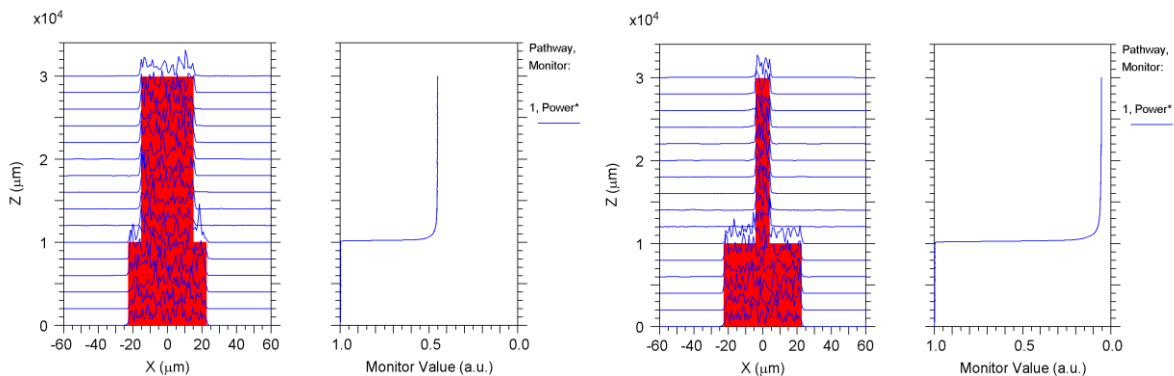
CHG vlákna jsou velice křehká, jejich pevnost v tahu je pouze desetinná než u křemenného optického vlákna. Pro mechanickou ochranu se využívá polymer, plast, nebo pryskyřicový povlak. Pro zlepšení toho nedostatku bylo testováno několik metod, jednou z metod je kombinace více polymerních vrstev, které se za tepla smrští. Mechanická pevnost je pak větší než za použití klasického jednovrstvého povlaku [3].

PRAKTICKÁ ČÁST

7. Simulace optického vlákna

Pro simulaci byl zvolen simulační program Synopsys BeamPROP. Tento program je založený na výpočtech pomocí metody BPM (Beam Propagation Method).

První simulace byla provedena pro přechod mezi vláknem ZBLAN a As_2S_3 . Simulace byla prováděna pro vlnovou délku $2,5 \mu\text{m}$. Důvodem zvolení této hodnoty je skutečnost, že pro charakterizaci vláken v experimentální části byl využit zdroj Ocean Optics CoolRed, který má maximální intenzitu právě okolo této hodnoty. Délka struktury jádra byla zvolena pro takovou délku, kde došlo k ustálení vidů. Index lomu jádra pro vlákno As_2S_3 byl nastaven na hodnotu 2,4 a hodnota pro vlákno ZBLAN byla 1,5. Na obrázku 18 je vidět přechod mezi vlákny, kde vlákno ZBLAN má průměr jádra $450 \mu\text{m}$ a na něj je navázáno vlákno As_2S_3 s průměrem jádra $300 \mu\text{m}$. Simulací vypočítaná ztráta je 3 dB. Druhou simulací byl přechod mezi vlákny ZBLAN a TeO_2 , kde průměr jádra TeO_2 byl $76 \mu\text{m}$ a index lomu nastaven na hodnotu 2. Ztráta tímto přechodem byla 10 dB. V obou případech byl budící signál po celé ploše jádra a byly buzeny všechny vidy.



Obrázek 18: a) Simulace pro přechod ZBLAN ($450 \mu\text{m}$) do As_2S_3 ($300 \mu\text{m}$), b) Simulace pro přechod ZBLAN ($450 \mu\text{m}$) do TeO_2 ($76 \mu\text{m}$)

8. Měření optických vláken

8.1. Měřená vlákna

Pro měření byla zvolena čtyři různá optická vlákna, a to: ZBLAN, As_2S_3 , TeO_2 a As_2Se_3 . Každé uvedené vlákno má rozdílné rozměry, které jsou uvedeny v tabulce 2 a parametry. V případě měření vzorků musí být brán ohled na tvrdost jednotlivých vláken a podle toho s nimi i zacházet. Měřená vlákna jsou velice křehká, především TeO_2 , které se láme již při velmi malém namáhání z důvodu chybějící ochranné vrstvy. Na rozdíl od ZBLAN nebo TeO_2 je As_2S_3 vlákno toxické. Při manipulaci s chalkogenidovým vláknem byly použity rukavice a ochranné brýle.

Referenční vlákno ZBLAN má rozsah 285– 4500 nm. Útlum vlákna je $\leq 0,2$ dB/m (pro rozsah 2.0 - 3.6 μm) [24].

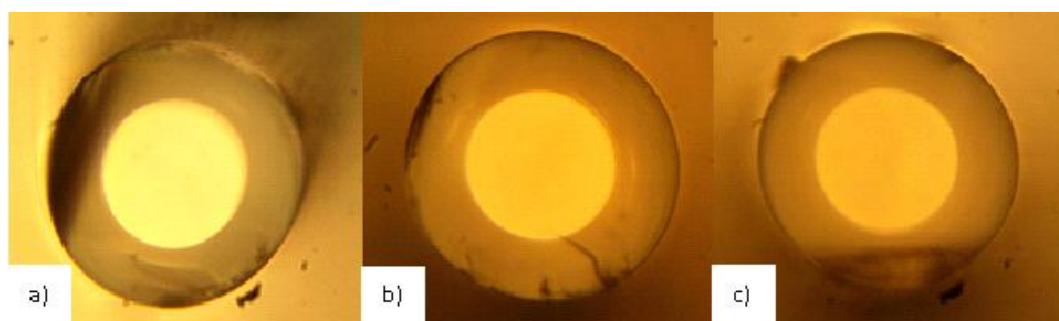
Vlákno	Průměr jádra (μm)	Průměr pláště (μm)	Délka vzorku (cm)
ZBLAN (multimodové)	450	540	100
As_2S_3 (multimodové)	300	-	100
TeO_2 (multimodové)	76	140	28
As_2Se_3 (jednovidové)	6,3	172	450

Tabulka 2: Velikosti jednotlivých vláken

8.2 Technologická příprava vláken k měření

Vlákno připravené pro měření muselo být nejprve zalomeno na koncích, aby docházelo k co nejmenší ztrátě na přechodu vláken a k co nejvíce kvalitnímu vstupu světla do vlákna. Každé vlákno vzhledem ke svému materiálu vyžaduje rozdílné metody pro zalomení. Zalomení bylo v našem případě prováděno pomocí ostré žiletky, nebo keramického nože. U vlákna As_2S_3 bylo vlákno zalomeno žiletkou, protože se nejedná o tak křehké vlákno jako je TeO_2 u kterého pro zalomení musel být použit speciální keramický břit, kterým je vlákno naříznuto a posléze odlomeno. Před zalamováním, byla konce vláken očištěna alkoholem z důvodu minimalizace znečištění zalamovaného konce. Po zalomení vlákna byla provedena kontrola od-

lomku (protikus) pod mikroskopem, aby bylo zjištěno, jestli se dané vlákno může použít pro měření. Příklad odlomků TeO_2 vlákna pod mikroskopem je znázorněn na obr. 19. Na prvních dvou snímcích jsou zobrazeny kusy, které nebylo možné použít pro měření. Na prvním snímku (a) je vidět silný zásah do pláště a okrajové znečištění. Na rozdíl od prvního příkladu, na druhém vzorku (b) není tak znatelný zásah do pláště, ale na spodní straně je prasklina, kvůli které se nedá vlákno použít. Třetí snímek (c) zobrazuje vzorek s lomem, který byl použit pro měření. Vhodně zalomené konce vláken upneme do rychlokonektorů.



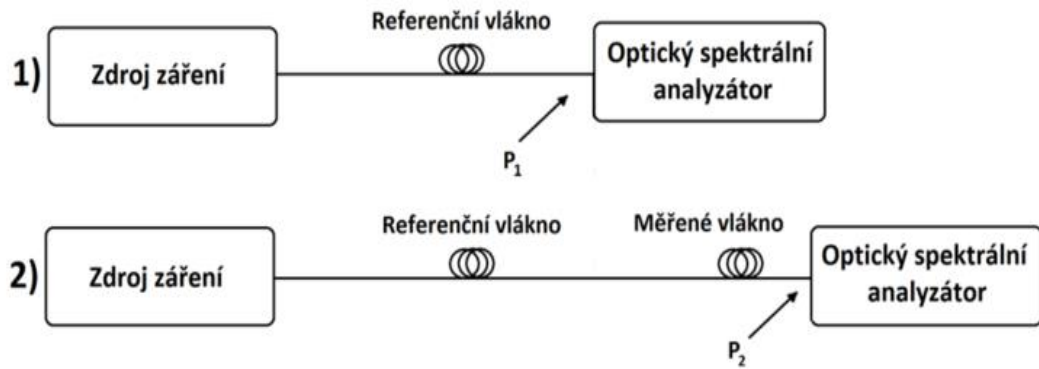
Obrázek 19: Tři různé druhy odlomků TeO_2

8.3 Postup měření

Měření bylo prováděno metodou vložných ztrát. Jako referenční vlákno bylo zvoleno vlákno ZBLAN. Metodu vložných ztrát (obr. 20) volíme především z důvodu, že se jedná o nedestruktivní metodu měření optických vláken na rozdíl od metody dvou délek, kde dochází ke zkrácení vláknového segmentu. Výhodou této metody je eliminace vlivu vazby vlákna na zdroj a detektor.

Touto metodou jsme schopni změřit vložné ztráty jak pro optické trasy, tak i konektory a spojky. Nejprve se provede přímé měření referenčního vlákna, a poté se do měřicího systému připojí měřené vlákno. Prvním krokem v měření je provedení kalibrace měřicí soustavy přímým propojením optického zdroje s optickým detektorem. Tímto měřením získáme hodnotu optického referenčního výkonu P_1 . V druhém kroku se měřené vlákno zapojí mezi optický vysílač a přijímač, výsledkem je hodnota výkonu P_2 . Pokles výkonu na detektoru pak představuje útlum na délce, o které se vlákna lišila.

Přesnost měření je v našem případě přibližně 0,5-1,0 dB a je ovlivněna rozdíly v kvalitě lomu zkoumaných vláken (vzhledem k jejich křehkosti), čistotě vláknových čel a numerické aparatuře měřeného a referenčního optického vlákna.



Obrázek 20: Principiální schéma zapojení

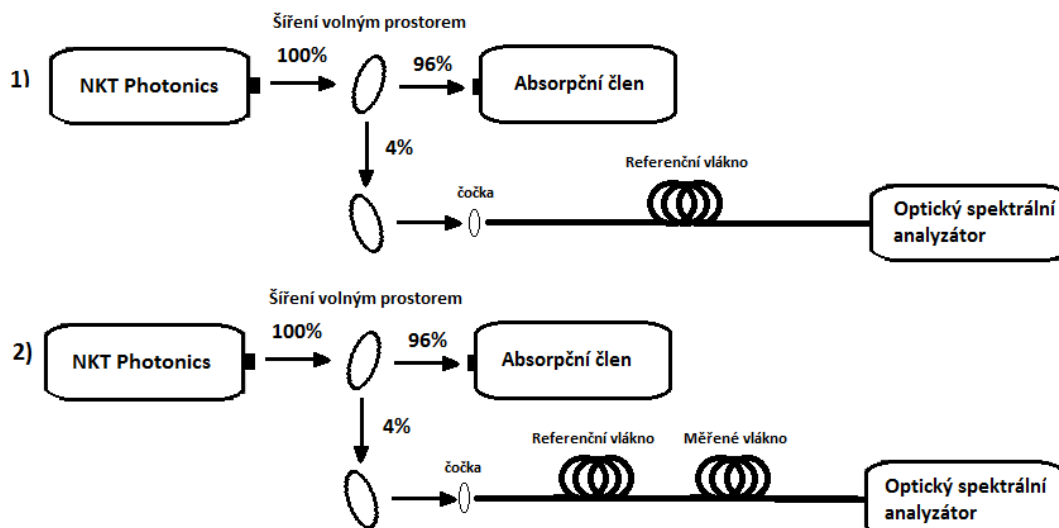
Hodnoty útlumu trasy vypočítáme ze vztahu

$$a(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} [dB]$$

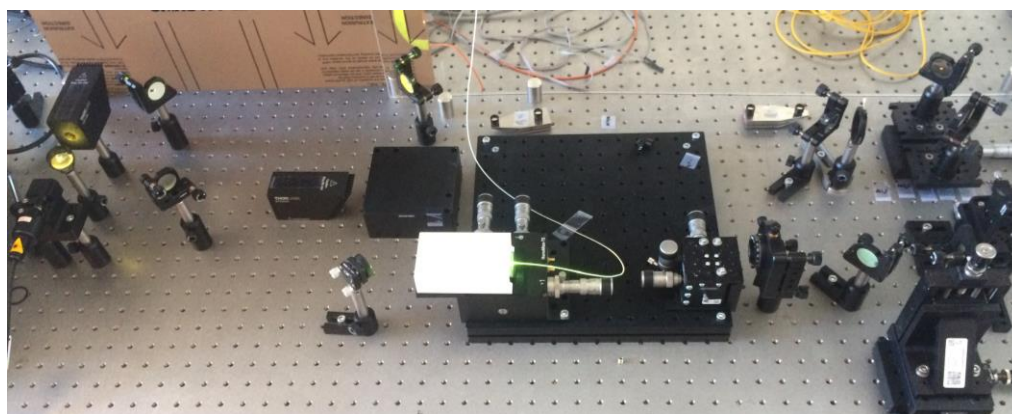
kde $a(\lambda)$ je útlum trasy na dané vlnové délce [dB], P_1 je výkon navázaný do vlákna na začátku tras [W], P_2 je výkon vyvázaný na konci trasy [W]

V prvním kroku bylo změřeno referenční vlákno přímo připojené na zdroj záření a detektor. V druhém kroku musí být připojeno měřené vlákno za vlákno referenční. Trasa měření obsahuje zdroj záření, referenční vlákno, měřené vlákno, konektory a detektor, který je připojen k počítači. Signál jdoucí od zdroje přes referenční a měřené vlákno byl zaznamenán pomocí detektoru a zobrazen na připojeném počítači.

Pro měření vlákna As_2Se_3 byla provedena mírně upravená metoda (obr. 21) z důvodu, že se jedná o jednovidové vlákno. Zdroj světla bylo v našem případě Supercontinuum NKT Photonics. Z laseru vystupuje optický výkon až 6 W. Světlo se z laseru šíří volným prostorem na odrazné sklíčko, kde se 4 % část světelného paprsku odrazí a postupuje dál, druhý paprsek (96%) je absorbován. Paprsek světla je navázán do jednovidového optického vlákna pomocí asférické čočky. Vlákno je připojeno přes útlumový článek, který je naladěn na 0 dBm a dále putuje do spektrálního analyzátoru. V druhém kroku připojíme za útlumový článek ještě měřené vlákno. Šíření volným prostorem a navázání paprsku do vlákna je ukázáno na obrázku 21, snímek zapojení je pak zobrazen na obrázku 22. Měření bylo prováděno v rozsahu 800-1700 nm, tedy pro oblast NIR z důvodu zjištění spodní hranice propustnosti vlákna.



Obrázek 21: Schéma zapojení pro měření vlákna As_2Se_3



Obrázek 22: Ukázka přenosu volným prostorem a napojením svazku světla do vlákna

8.4. Zdroje a detektory

Pro měření vlákna As_2S_3 byl použit zdroj záření Ocean Optics Cool Red společně s optickým spektrálním analyzátelem ARCoptix FT-IR Rocket. Zdroj má rozsah 1000-5000 nm s maximální intenzitou na bodě 2000-2500 nm a optický analyzátor zaznamenává rozsah 2000-6000 nm. Takto vybrané přístroje vytvořily měřený rozsah 2000-5000 nm. Pro oblast NIR vlákna As_2S_3 byl využit zdroj HL-2000 Series s rozsahem 360 - 2400 nm ve společném zapojení s optickým analyzátelem SIR-1700 VIS/NIR, který má rozsah 400-1700 nm a maximální intenzitu na hodnotě 1800 nm. Pomocí tohoto zapojení bylo možné změřit NIR oblast vlákna As_2S_3 od 400 do 1700 nm.

Pro vlákna TeO_2 byl využit zdroj záření THORLABS SLS202L s rozsahem 450-5500 nm, který jako jediný ze zdrojů byl schopný prosvítit vlákno. Tento zdroj má maximální intenzitu na hodnotě 1500 nm. V zapojení se spektrálním analyzátozem ARCOptix FT-IR vytvořili rozsah měření od 2000-5500 nm.

Pro měření jednovidového vlákna As_2Se_3 v oblasti NIR byl jako zdroj použit NKT Photonics EXR 15, který má rozsah vlnových délek 400-2400 nm. V zapojení se spektrálním analyzátozem YOKOGAWA AO6370C byl vytvořen měřený rozsah 600-1700 nm.

Zdroj světla	Rozsah vlnových délek (nm)
THORLABS SLS202L	450 – 5500
Ocean Optics Cool Red	1000 – 5000
HL-2000 Series	360 – 2400
NKT Photonics EXR 15	400 – 2400

Tabulka 3: Zdroje záření využité při měření

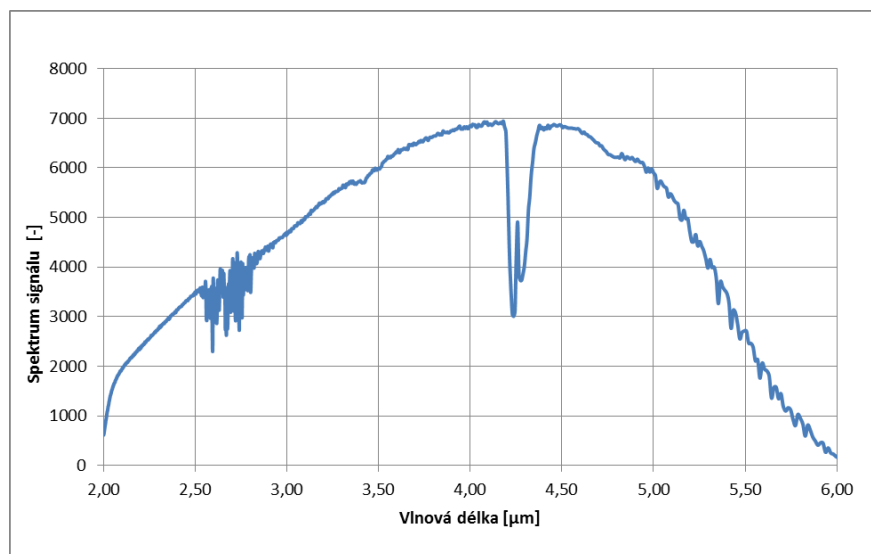
Optické spektrální analyzátory	Rozsah (nm)
SIR-1700 VIS/NIR	400 – 1700
ARCOptix FT-IR Rocket	2000 – 6000
YOKOGAWA AO6370C	600 – 1700

Tabulka 4: Detektory využité při měření

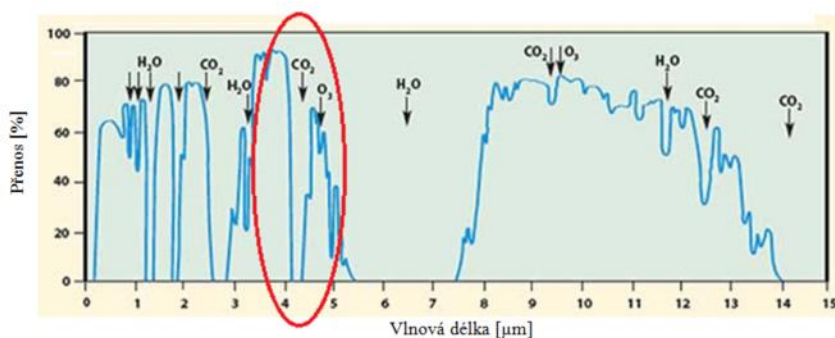
9. Výsledky měření

Po provedení několika měření pomocí zdroje záření CoolRed s detektorem FT-MIR Rocket 2-6 μm bylo zjištěno, že je výrazný pokles v měřeném spektru všech vláken na hodnotách okolo 2,47- 2,98 μm a 4,17- 4,42 μm . Z tohoto důvodu bylo změřeno světlo jdoucí volným prostorem ze zdroje přímo do detektoru. Jak je vidět na obrázku 23 tyto poklesy nejsou zaviněny vláknem, ale použitým detektorem. Tato oblast ztratí by mohla být zaviněna absorpčním spektrem oxidu uhličitého, které je znázorněno na obrázku 24.

Pro další grafy a výpočty došlo k zanedbání této oblasti a další spektra už jsou vykreslena bez těchto částí.



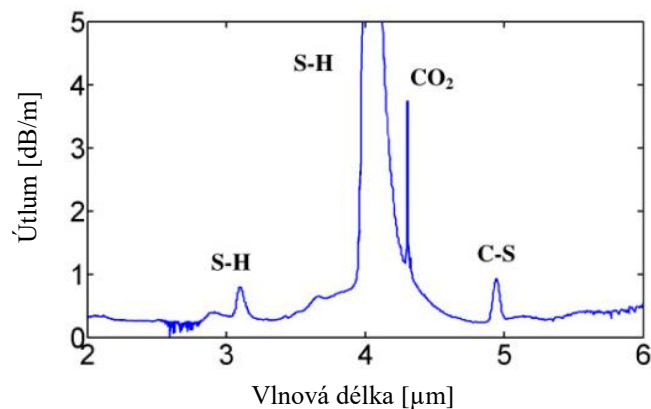
Obrázek 23: Charakteristika přímého propojení zdroje záření a spektrálního analyzátoru



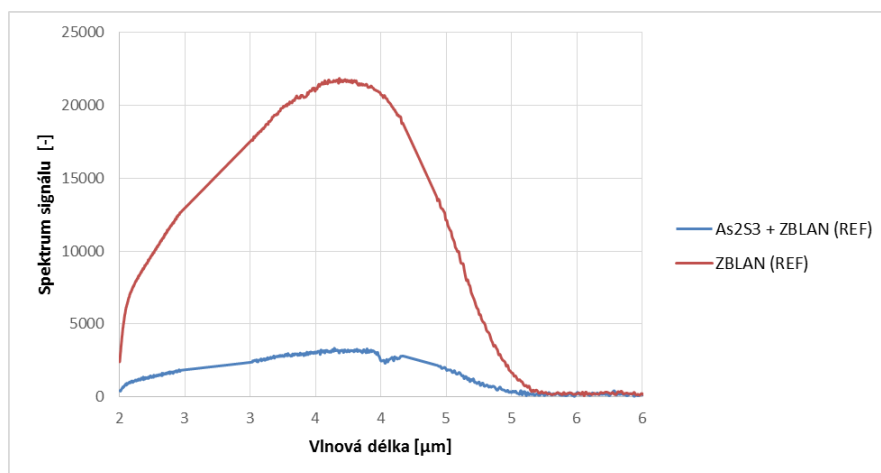
Obrázek 24: Absorpce zapříčiněná CO_2 a H_2O [25]

9.1 Vláknó As_2S_3

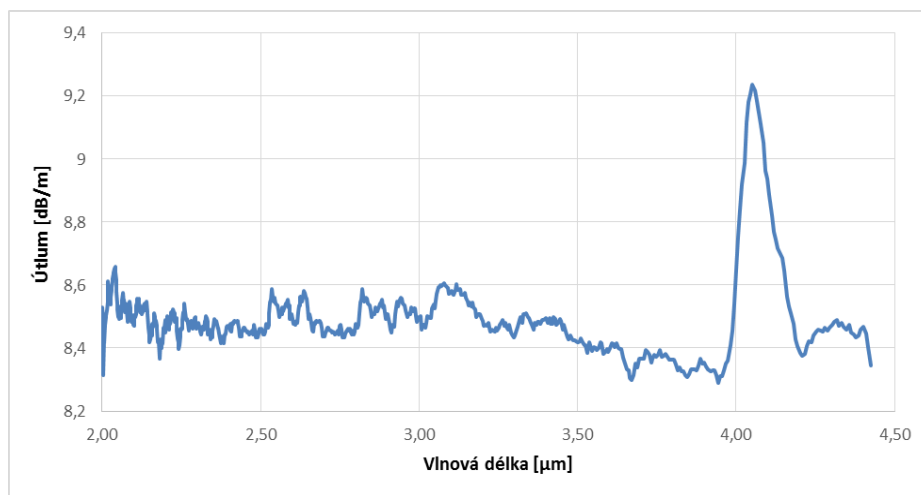
Vláknó As_2S_3 bylo měřeno v rozsahu 2-5 μm pomocí zdroje CoolRed a detektoru AR-Coptix FT-IR Rocket. Pro tento typ vláken je charakteristický pokles úrovně signálu na vlnové délce okolo 4,1 μm , který je zaviněn S-H absorbním pásem viz. obrázek 25. Na obrázku 26 je zaznamenána spektrální charakteristika. Útlum vlákná se pohybuje mezi hodnotami 5,3-5,7 dB/m při využití korekčního faktoru ze simulace přechodu ZBLAN- As_2S_3 . Na obrázku 27 je znázorněna typická útlumová křivka vlákná As_2S_3 . Je zde dobře viditelný S-H absorbní pás.



Obrázek 25: Typická útlumová křivka vlákná As_2S_3 . [21]

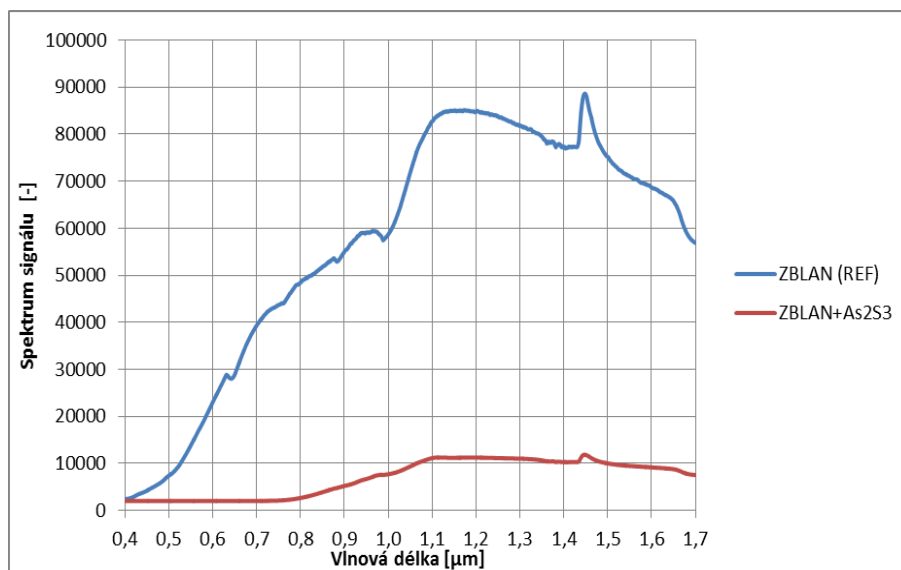


Obrázek 26: Měřená spektrální charakteristika vlákná ZBLAN a As_2S_3

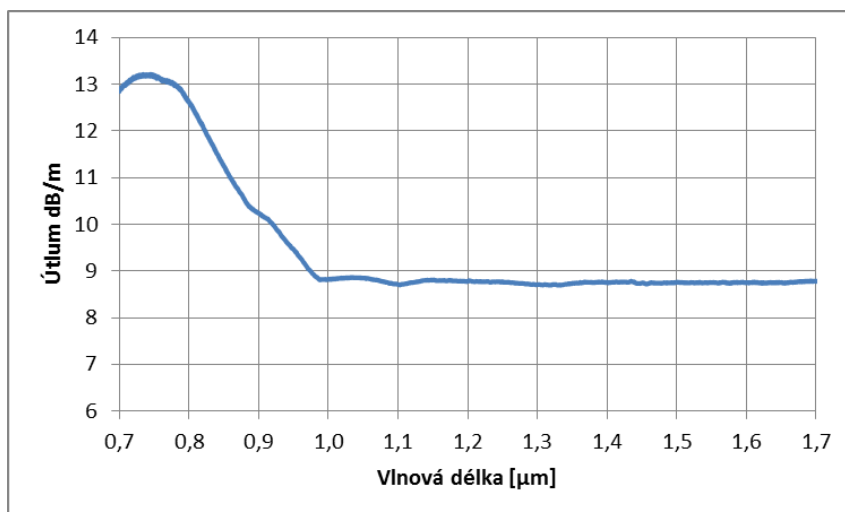


Obrázek 27: Útlum vlákna As_2S_3

Pro přesné zjištění, jak vlákno As_2S_3 vede v oblasti NIR, bylo za pomoci zdroje HL-2000 a detektoru SIR-1700 VIS/NIR vlákno změřeno pro tuto oblast. Z útlumové charakteristiky je zřetelné, že vlákno začíná být transparentní na 800 nm. Útlum v této oblasti se pohybuje okolo 5,7 dB/m.



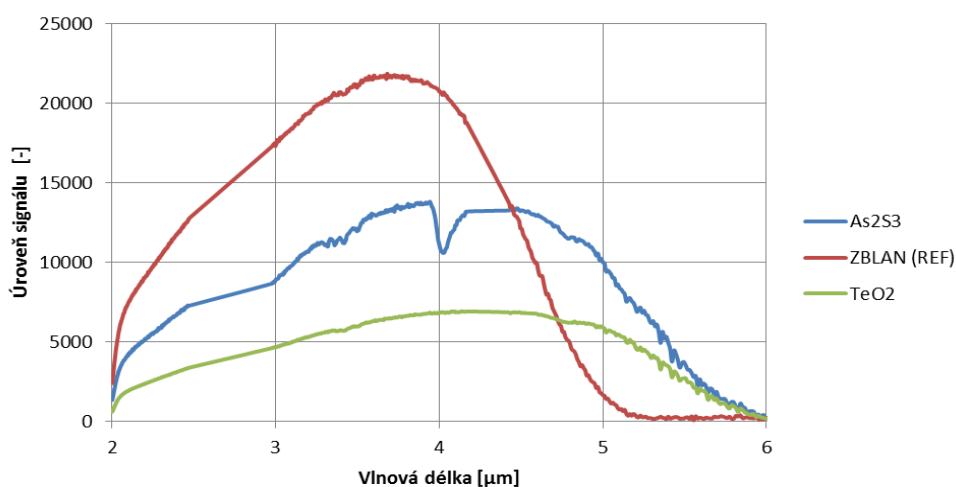
Obrázek 28: Spektrum signálu vlákna As_2S_3 pro oblast VIS a NIR v závislosti na vlnové délce



Obrázek 29: Útlumová charakteristika vlákna As₂S₃ pro oblast NIR

9.2 Vlákno TeO₂

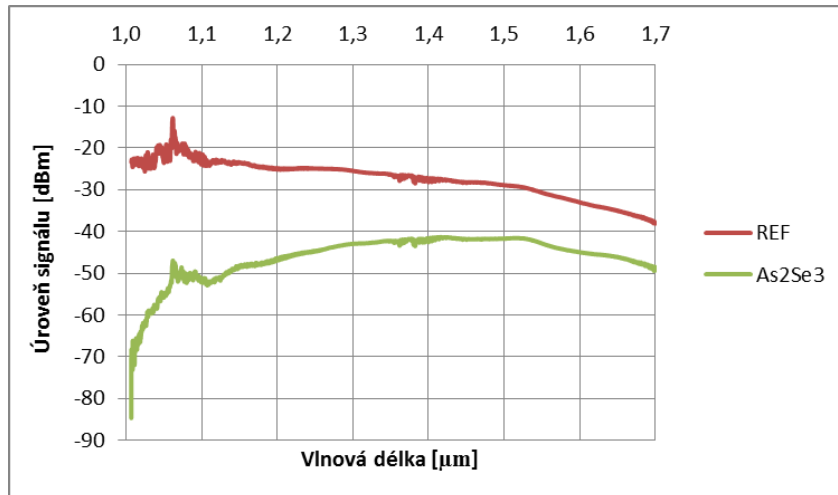
Útlum vlákna TeO₂, pomocí metody vložných ztrát nebylo možné stanovit, protože na přechodu mezi referenčním a měřeným vláknem docházelo k velkým ztrátám, což potvrdilo simulační předpoklady, a tedy citlivost měřicí aparatury nebyla dostatečná. Podařilo se nám změřit alespoň charakteristiku samotného zadaného vlákna, které můžeme porovnat s ostatními změřenými vlákny. Na obrázku 30 je vidět, že jak vlákno TeO₂, tak As₂S₃ mají širší přenosové okno než vlákno ZBLAN. Obě vlákna jsou omezena šířkou pásma zdroje na rozdíl od vlákna ZBLAN u kterého je patrné, že jeho přenos končí na 4,5 μm. Obrázek 30 zobrazuje jen transparentnost jednotlivých vláken bez závislosti na úrovni signálu.



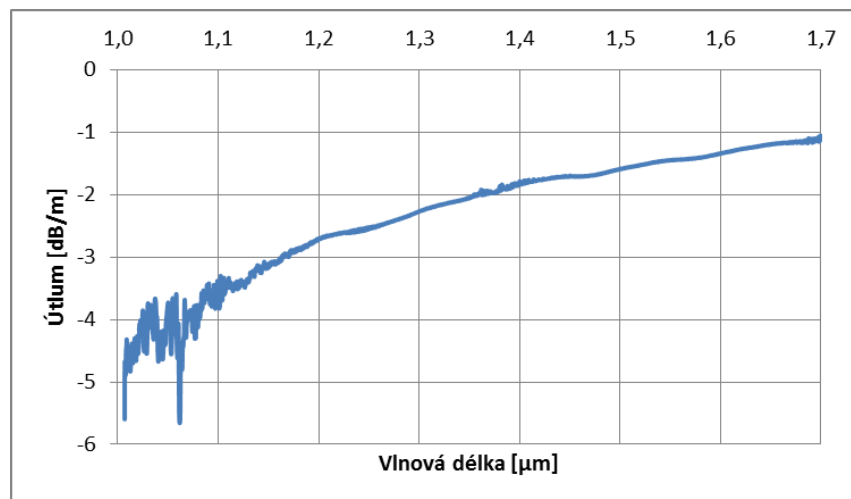
Obrázek 30: Transparentnost jednotlivých vláken

9.3 Vláknó As_2Se_3 pro oblast 1000-1700 nm

Pro zjištění parametrů jednovidové vláknó As_2Se_3 v oblasti NIR, bylo za pomoci Supercontinua a optického spektrálního analyzátoru Yokogawa, vláknó změřeno. Z útlumové charakteristiky je vidět, že vláknó začíná být transparentní od hodnoty 1100 nm. Ztráta v této oblasti se pohybuje od 1 dB/m až 3 dB/m.



Obrázek 31: Spektrum signálu vláknó As_2Se_3 pro oblast NIR v závislosti na vlnové délce



Obrázek 32: Útlumová charakteristika vláknó As_2Se_3 pro oblast NIR

10. Aplikační potenciál měřených vláken

V této práci se jednalo zejména o experimentální měření, které mělo naznačit chování různých typů vlákne pro oblast NIR a MIR. Pro reálné využití bude čerpáno především z poznatků získaných v teoretické části této práce.

Materiál	Transparence (nm)	Minimální ztráta (dB/m)
ZBLAN	2000-4500	$\leq 0,2$ (2-3,6 μm)
As ₂ S ₃	800-5000	5,29 (3,94 μm)
As ₂ Se ₃	1000-1700	1,06 (1,7 μm)
TeO ₂	2000-5000	-

Tabulka 5: Naměřené hodnoty vláken

Využití chalkogenidových vláken pro přenos signálu na dlouhou vzdálenost je omezena vysokým útlumem řádově desítky až tisíce dB/km. Optická chalkogenidová vlákna se využívají pro přenos signálu na krátkou vzdálenost, v CO₂ laserech v chirurgii jako laserový skalpel nebo pro svařování a řezání. U chalkogenidových vláken se využívá především jejich velké nelinearity, která může být až 1000x větší než u běžného křemenného vlákna. Vysoká nelinearita poskytuje efektivní generování superkontinua umožňující vytváření širokopásmových zdrojů (NIR-MIR) [26].

Fluoridy se vyznačují nízkým útlumem v telekomunikačním pásmu kolem 0,1 dB/km, a zároveň jsou transparentní v infračervené oblasti 2 až 5 μm . Mají poměrně nízký index lomu ve srovnání s SiO₂ – konkrétně pro ZBLAN je to hodnota 1,5. [27] YAG lasery dopované ionty Erbium jsou stále více populární v lékařských aplikacích, obzvláště ve stomatologii, dermatologii a urologii, protože vysílají s vlnovou délkou 2,9 μm , která přesně odpovídá absorpci vody. Vlákna z fluoridového skla jsou vhodná pro tyto aplikace, protože jsou pružná a vykazují nejnižší útlum při 2,9 μm [28].

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení analýzy vhodných skelných materiálů, které mohou být využity pro výrobu optických vláken pro střední infračervenou oblast. Mezi tyto materiály byla vybrána především skla na bázi oxidů těžkých kovů, jako jsou telluričitá a (olovo-) germaničitá skla, dále poté halogenidová skla (fluoridy a chloridy) a chalkogenidová skla. Celá jedna kapitola je věnována možnostem výroby, protože různé materiály využívají různých způsobů při výrobě. Pozornost byla věnována jednotlivým vláknům především z pohledu jejich přenosových parametrů a měrného útlumu. Optická vlákna pro střední infračervenou oblast mají obvykle ztrátu v jednotkách dB/m. Mezi nejvíce komerčně využívaná vlákna v této oblasti řadíme vlákna ZBLAN, která mají útlum $\leq 0,2$ dB/m (pro 2.0 -3.6 μm).

Pro zjištění ztrát na přechodech mezi jednotlivými vlákny s různými konstrukčními parametry (průměry jádra), bylo využito simulačního programu Synopsys BeamPROP., který poskytl teoretické ztráty pro jednotlivé přechody. Po provedení simulace vláken, bylo zjištěno, že ztráty na přechodu mezi vlákny ZBLAN a As_2S_3 jsou 3 dB a u vlákna TeO_2 je ztráta 10 dB. Simulací TeO_2 vlákna bylo ověřeno, že ztráta dosahuje vysoké hodnoty, při které není možné provést měření pomocí metody vložných ztrát při tomto přechodu, což bylo ověřeno i prakticky. Metodou vložných ztrát jsme postupně měřili všechny zadaná vlákna. U vlákna As_2S_3 bylo provedeno měření jak pro oblast NIR, tak oblast MIR. Útlum vlákna se pohyboval mezi hodnotami 5,4-5,6 dB/m. Na spektru vlákna je dobře vidět S-H absorpční pás na hodnotě okolo 4,1 μm . Vláknem TeO_2 nebylo možné změřit protože na přechodu docházelo k velké ztrátě. Možnost pro změření vlákna s tak velkým rozdílem průměrů jader, by bylo možné za použití např. čoček, aby došlo k lepšímu přenosu do druhého vlákna. I když se nepodařilo změřit útlum vlákna, byla změřena alespoň transparence daného vlákna. Díky tomu můžeme porovnat měřená vlákna z pohledu šířky přenosového pásma. ZBLAN vlákno je transparentní pro oblast MIR přibližně od 2 μm do 4,5 μm . Ostatní měřená vlákna jsou transparentní dále do oblasti MIR, ale naše měření bylo omezeno zdrojem světla. Změřením chalkogenidových vláken v oblasti NIR ukázalo, že tato vlákna začínají být transparentní až od 1 μm .

SEZNAM LITERATURY

- [1] "Principles of remote sensing - centre for remote imaging, sensing and processing, CRISP,". [Online]. Dostupné z: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm>. Accessed: Feb. 6, 2017.
- [2] P. Zhang, J. Zhang, P. Yang, S. Dai, X. Wang, and W. Zhang, "Fabrication of chalcogenide glass photonic crystal fibers with mechanical drilling," *Optical Fiber Technology*, vol. 26, pp. 176–179, Dec. 2015.
- [3] Guangming Tao, Heike Ebendorff-Heidepriem, Alexander M. Stolyarov, Sylvain Danto, John V. Badding, Yoel Fink, John Ballato, and Ayman F. Abouraddy, "Infrared fibers," *Adv. Opt. Photon.* 7, 379-458 (2015)
- [4] James A. Harrington , *Infrared Fiber Optics*,
Dostupné z: http://irfibers.rutgers.edu/resources/publications/2007/ir_fiber_review.pdf. Accessed: Feb. 6, 2017.
- [5] 2016, "MID-IR OPTICS: Fluoride glasses draw fiber into the mid-infrared," 2007. [Online]. Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-43/issue-5/features/mid-ir-optics-fluoride-glasses-draw-fiber-into-the-mid-infrared.html>. Accessed: Feb. 6, 2017.
- [6] J. Toulouse, A. Lin, A. Ryaznyanskiy, A. Belwalkar, C. Guintrand, C. Lafontaine, W. Misiolek, and I. Biaggio, "Development of new tellurite fibers for mid-IR applications," in *Winter Topicals (WTM) (IEEE, 2011)*, pp. 185–186.
- [7] F. Yu, W. Wadsworth, and J. Knight, "Low loss silica hollow core fibers for 3–4 μm spectral region," *Opt. Express* 20, 11153-11158 (2012).

- [8] "Guidelines on what loss to expect when testing fiber optic cables,". [Online]. Dostupné z: <http://www.thefoa.org/tech/loss-est.htm>. Accessed: Feb. 6, 2017.
- [9] S. S. Ballard, K. A. McCarthy, W. L. Wolfe, IRIA State-of-the-Art Report Optical Materials for Infrared Instrumentation, January 1959.
- [10] Precision Optical Components. RMI Precision Custom Optics & Coatings [online]. Copyright © 2014 Rocky Mountain Instrument Co. [cit. 25.05.2017]. Dostupné z: <http://rmico.com/capabilities/optics>
- [11]. [online]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka%20vlakna.pdf>.
- [12] G. Tao and A. F. Abouraddy, "Optoelectronics & communications,". [Online]. Dostupné z: <http://spie.org/newsroom/5660-robust-fibers-for-delivering-infrared-light>. Accessed: Feb. 8, 2017.
- [13] I. Ishida, T. Akamatsu, Z. Wang, Y. Sasaki, K. Takenaga and S. Matsuo, "Possibility of stack and draw process as fabrication technology for multi-core fiber," 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, 2013, pp. 1-3.
- [14] A. A. Beales, P. W. France and S. Partington, "Double crucible optical fibre for data link applications," in Electronics Letters, vol. 17, no. 22, pp. 846-848, October 29 1981.
- [15] A. Chavez-Pirson et al., "Tellurite glass and fiber development for Mid-IR transport and supercontinuum applications," 2011 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Montreal, QC, 2011, pp. 91-91.

- [16] H. T. Munasinghe et al., "Fabrication and properties of lead-germanate glasses for high nonlinearity fibre applications," 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), London, 2013, pp. 1-3
- [17] H. Ebendorff-Heidepriem et al., "Fluoride glass microstructured optical fibre with large mode area and mid-infrared transmission," OECC/ACOFT 2008 - Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology, Sydney, 2008, pp. 1-2
- [18] J. Bei, H. Ebendorff-Heidepriem, R. Moore and T. M. Monro, "Fluoroindate fibres with reduced loss in the mid infrared spectral region: A study of the glass melting and fibre preparation conditions," 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian Conference on Optical Fibre Technology, Sydney, NSW, 2011, pp. 1409-1411
- [19] T. Kanamori, Y. Terunuma, S. Takahashi and T. Miyashita, "Chalcogenide glass fibers for mid-infrared transmission," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 607-613, Oct 1984.
- [20] P. Lucas, G. J. Coleman, S. Jiang, T. Luo and Z. Yang, "Fabrication, characterization and applications of infrared transparent chalcogenide fibers," 2014 IEEE Photonics Conference, San Diego, CA, 2014, pp. 475-476.
- [21] M. El-Amraoui, J. Fatome, J. C. Jules, B. Kibler, G. Gadret, C. Fortier, F. Smektala, I. Skripatchev, C.F. Polacchini, Y. Messaddeq, J. Troles, L. Brilland, M. Szpulak, and G. Renversez, "Strong infrared spectral broadening in low-loss As-S chalcogenide suspended core microstructured optical fibers," *Opt. Express* 18, 4547-4556 (2010)
- [22] ZBLAN Fluoride Glass Fibers & Cables | Fiberlabs Inc. Amplifiers, Fiber Output-Light Sources, Fluoride Fibers-FiberLabs Inc [online]. Copyright © [cit. 25.05.2017]. Dostupné z: https://www.fiberlabs-inc.com/fiber_index/

[23] Encyclopedia of Laser Physics and Technology - fluoride fibers, fluorozirconate, infrared, transparency, multi-phonon transitions, amplifiers. RP Photonics Consulting GmbH - technical consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software; encyclopedia and buyer's guide [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH, [cit. 25.05.2017]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fluoride_fibers.html

[24] Thorlabs - MZ41L1 Ø450 µm, 0.20 NA ZrF4 Patch Cable, SMA905, 1 m. Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control [online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MZ41L1>

[25] [online]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25132>

[26] Nonlinear Applications | IRFlex Corporation. IRFlex Corporation | The Mid-IR Fiber Devices Company [online]. Dostupné z: <http://irflex.com/applications/nonlinear-applications>

[27] PCF přenosová vlákna. Publi.cz [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/235/02.html>

[28] [online]. Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-43/issue-5/features/mid-ir-optics-fluoride-glasses-draw-fiber-into-the-mid-infrared.html>