

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole

**Refraktometrická detekce kapalin za využití
mikrostrukturálních optických vláken**

květen 2015

Diplomant: Bc. Aleš Panocha

Vedoucí práce: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.

Pedagogický konzultant: Prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací vypracoval samostatně s přispěním vedoucího práce a konzultantů a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 2.5.2015

.....

Aleš Panocha

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Matěji Komancovi, Ph.D., Prof. Ing. Stanislavu Zvánovci, Ph.D. a Ing. Tomáši Němečkovi za poskytnutí podkladů k vypracování a za cenné rady. Také bych chtěl poděkovat rodině za podporu v době psaní tohoto projektu.

Aleš Panocha

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Panocha Aleš**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Refraktometrická detekce kapalin za využití mikrostrukturálních optických vláken**

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce se bude na základě analýzy metod detekce kapalin pomocí mikrostrukturálních optických vláken zabývat zejména experimentální stránkou. Student vyjde z vypracovaných simulací za využití křemenných mikrostrukturálních vláken pro detekci kapalin o indexech lomu v rozmezí 1.33 až 1.43. Pomocí směsí vhodných kapalin vytvoří testovací sadu a vyhodnotí přesnost měření. Dále provede citlivostní analýzu s ohledem na daná mikrostrukturální vlákna. Měření bude realizováno i v závislosti na vlnové délce. Výsledkem by měla být doporučení pro vhodné využití rozdílných typů mikrostrukturálních vláken a porovnání měřeného překryvu evanescentního pole do analytu s teoretickými předpoklady.

Pedagogický konzultant: Prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Seznam odborné literatury:

[1] José Miguel López-Higuera: Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Wiley, 2002, ISBN-10: 0471820539

Vedoucí: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 11. 2014

Anotace:

Tématem diplomové práce je refraktometrická detekce kapalin s využitím mikrostrukturálních optických vláken. V teoretické části jsou rozebrány druhy mikrostrukturálních optických vláken, jejich vlastnosti a použití v praktických aplikacích. V této části jsou popsány i počítačové simulace, jež vytvořily podklady pro experimentální praktickou část. V praktické části jsou následně uvedeny postupy měření a dosažené výsledky refraktometrické detekce kapalin. Pro účel měření byly jako experimentální kapaliny použity etylalkohol a isopropylalkohol. Měření bylo provedeno s vlákny typu Suspended Core a Photonic Crystal Fiber.

Klíčová slova: mikrostrukturální optické vlákno, Suspended Core, Photonic Crystal Fiber, detekce kapalin

Summary:

The theme of the Diploma Thesis is utilizing of microstructural optical fibers for refractive index detection of liquids. In the theoretical part there is a description of Microstructural optical Fibers, their characteristics and real applications. The outcome of computer simulation forms the basis for the experimental part. The experimental part then describes measurement method, which has been used for refractive index detection of liquids and presents the results of experimental testing. Ethyl alcohol and Isopropyl alcohol were used as tested liquids and Suspended Core a Photonic Crystal Fiber were used for measurement purposes.

Index Terms: microstructural optical fiber, Suspended Core, Photonic Crystal Fiber, liquid detection

1. Úvod	7
2. Úvod do mikrostrukturálních vláken	8
2.1 Historie mikrostrukturálních vláken	8
2.2 Obecné vlastnosti	9
2.3 Výroba mikrostrukturálního vlákna	10
3. Typy mikrostrukturálních vláken	12
3.1 Photonic Crystal Fiber	13
3.2 Suspended Core Photonic Crystal Fiber	14
3.3 Hollow Core Photonic Crystal Fiber	15
3.4 Bragg Photonic Crystal Fiber	17
3.5 Aplikace mikrostrukturálních vláken	18
4. Simulace	21
4.1 Simulace Suspended Core	21
4.1.1 Výsledky simulací vlákna Suspended Core	23
4.2 Simulace Endlessly Single Mode 12B	26
4.2.1 Výsledky simulací Endlessly Single Mode 12B	27
5. Experimentální část	30
5.1 Příprava měření	30
5.2 Popis měřicí sestavy	32
5.3 Naladění měřicí sestavy	34
5.4 Aplikace měřených vzorků kapalin do mikrostrukturálních vláken	36
5.5 Postup měření	37
5.6 Naměřené výsledky Suspended Core	38
5.7 Naměřené výsledky Endlessly Single Mode	41
6. Závěr	44
Seznam literatury	46
Seznam obrázků	48
Příloha	49

1. Úvod

V diplomové práci se zabývám využitím mikrostrukturních optických vláken pro detekci kapalin. Cílem je na základě teoretických předpokladů navrhnout a ověřit vhodnou metodu refraktometrické detekce kapalných látek s využitím mikrostrukturních optických vláken. Dále pak stanovit doporučení pro vhodné využití jednotlivých typů mikrostrukturních vláken pro tento způsob detekce.

Práce je rozdělena na dvě části, první se zabývá teoretickými předpoklady a simulacemi mikrostrukturních vláken, druhá je pak následně zaměřena na praktické měření.

V teoretické části práce popisuje druhy mikrostrukturních optických vláken. Jsou zde vysvětleny základní principy, jejich výroba, reálné použití v praktických aplikacích i pro měřicí a experimentální účely. V závěru teoretické části jsou popsány výsledky simulací.

Hlavní experimentální část se zabývá detekcí kapalin založené na analýze změn přenosových charakteristik mikrostrukturních optických vláken po implementaci kapalné látky v kapilárních trubkách. Pro měření byla zvolena vlákna typu Suspended Core a Endlessly Single Mode. Citlivostní analýzou na vlnových délkách 1310 a 1550nm byla ověřována možnost využití této metody pro detekci kapalin o indexech lomu v rozmezí 1,33 až 1,43.

2. Úvod do mikrostrukturních vláken

2.1 Historie mikrostrukturních vláken

S rozvojem nových technologií, a to zejména ve spojitosti s jejich digitalizací, vyvstal ve druhé polovině minulého století problém s omezenou přenosovou kapacitou stávajících komunikačních tras. Jako možné nosné médium se od šedesátých let dvacátého století jeví využití optických vláken, která by umožnila přenos informace pomocí světla. Dlouhotrvající vývoj v této oblasti vyústil v praktickou realizaci a od sedmdesátých let započala ve vyspělých zemích výstavba optických přenosových tras a obor optických přenosů se stal velice progresivním. Snahou vědeckých laboratoří zabývajících se využitím optických vláken bylo další zdokonalování optických systémů, vývoj a výroba kvalitnějších vláken schopných přenášet spolehlivě a s co nejmenším útlumem, co největší množství informací. Jako jednu z těchto snah dalšího vývoje v této oblasti lze označit vývoj nového typu optického vlákna, u kterého mělo být využito šíření elektromagnetické vlny vzduchem. Za tímto účelem vyvinul a vyrobil v 70. letech 20. stol. fyzik P. Kaiser první prototyp optického vlákna[1], do jehož jádra umístil vzduchové dutiny. Technologie výroby optických vláken však v této době nebyla schopna dosáhnout požadované kvality a přesnosti, a proto tyto počáteční pokusy nebyly příliš úspěšné a vývoj se stáhl do pozadí.

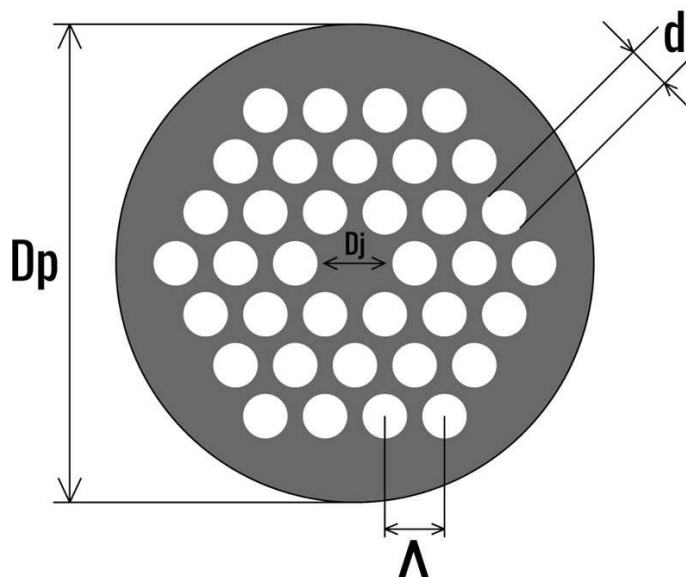
Od roku 1991 se Philip St. J. Russell zabýval myšlenkou nového typu optického vlákna, které nazval „Holey Fiber“. Výsledkem jeho výzkumu v této oblasti se stalo vlákno typu PCF (Photonic Crystal Fiber), které bylo publikováno v roce 1996 [2]. Tuto událost lze považovat za počátek širšího rozvoje mikrostrukturních optických vláken.

Mikrostrukturní optická vlákna jsou novým druhem světelných vlnovodů. Na rozdíl od běžných optických vláken se liší strukturou v řezu. Ten je charakteristický strukturálními obrazci vytvořenými z dutých kapilárních trubic, které významně ovlivňují přenosové vlastnosti vlákna. Dispersní charakteristika takového vlákna je pak určována kromě použitého materiálu i geometrickými tvary, velikostí a vzájemným uspořádáním dutin. Tento způsob umožňuje vytváření optických vláken se specifickými vlastnostmi, které nejsou dosažitelné klasickou technologií. Specifické vlastnosti takto vytvořených vláken primárně nenasměrovaly mikrostrukturní vlákna do oblasti telekomunikačních přenosů, ale předurčily

je k použití v intenzivně se rozvíjejících speciálních aplikacích. Jako příklad jejich použití v praxi lze uvést optické vláknové senzory, optické přepínače, filtry a další. [2-5]

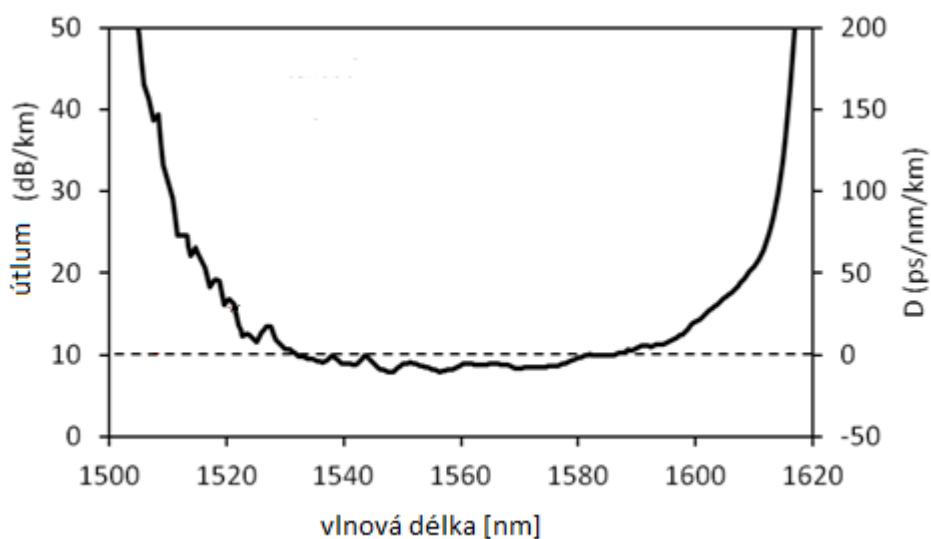
2.2 Obecné vlastnosti

Mikrostrukturální vlákna je nutno, z důvodu jejich složité vnitřní struktury, charakterizovat více parametry než vlákna klasická. Základní geometrické tvary a jejich rozměry jsou zobrazeny na obrázku 1. Patří mezi ně: průměr jádra D_j (jednotky až desítky μm), průměr vlákna D_p (desítky až stovky μm), průměr mikrostrukturálních dutin d (stovky až tisíce nm), rozteč jednotlivých mikrostruktur Λ (jednotky μm), materiál, druh jádra (duté, plné) a počet prstenců (kapilární dutiny, které jsou rozmístěny ve stejné vzdálenosti od jádra vlákna). Mezi optické parametry mikrostrukturálních vláken patří: útlum vlákna (jednotky až desítky dB/km), princip vedení světelného paprsku, hodnota numerické apertury a disperze.



Obr. 1 Struktura mikrostrukturálního vlákna v řezu

Útlumy standardních optických telekomunikačních vláken se pohybují v rozsahu 0,15-0,17dB/km. Současná mikrostrukturní vlákna stále ještě nedovedou dosáhnout těchto hodnot. Jejich útlum je závislý na konkrétním typu vlákna, použité technologii výroby a dopantu. Nejmenšího měrného útlumu dosahují mikrostrukturní vlákna typu Hollow Core a to hodnoty 1,2dB/km[5]. Tato hodnota je z hlediska použití v telekomunikační technice již přijatelná. Nízká hodnota útlumu je však spojena s vyššími nároky na výrobu a následně vysokou cenou. Pro vlákno typu Hollow Core 19 (HC 19), použitelné na vlnové délce 1550nm a vykazující útlum menší než 10db/km (obrázek 2), se cena na trhu pohybuje kolem 530 USD za jeden metr délky (cena k 1. 11. 2014). [3] [5-9]



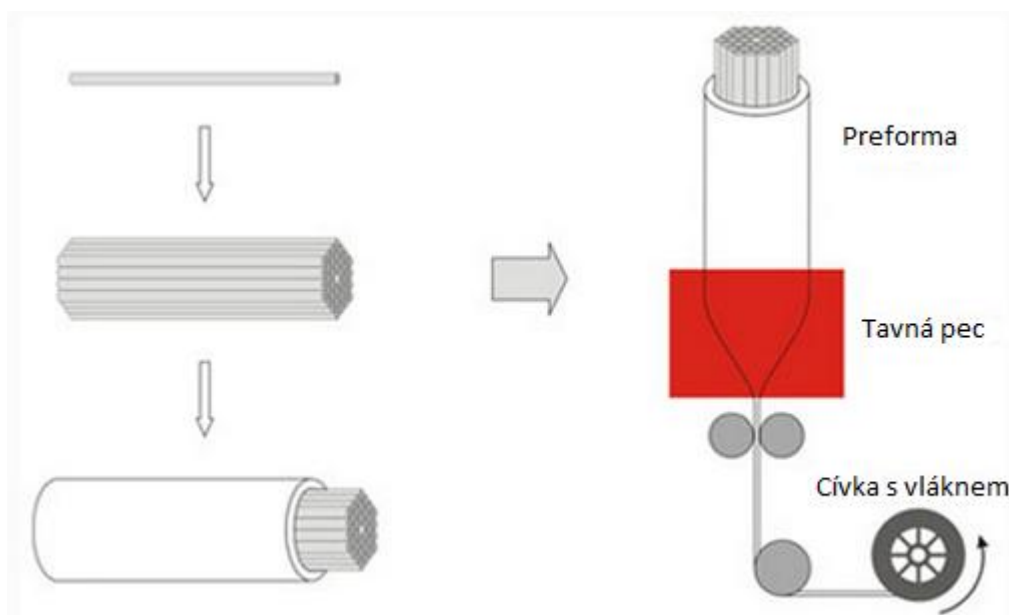
Obr. 2 Grafické zobrazení hodnoty útlumu HC19 vlákna v závislosti na délce [10]

2.3 Výroba mikrostrukturního vlákna

Výroba mikrostrukturního vlákna je technologicky velice náročná a nákladná. Kromě vysoké přesnosti, kdy je nutné dodržet stanovenou tvarovou strukturu, přispívá k vysokým výrobním nákladům i fakt, že jsou vlákna vytvářena v malých specifických sériích. Při samotné výrobě se vychází z běžných technologií výroby standardních křemenných vláken. Technologický postup je rozšířen o několik dílčích charakteristických kroků a výroba probíhá ve stávajících výrobních laboratořích. V prvním výrobním kroku je vytvořeno několik užších kapilárních křemenných tyčí. Tyto tyče již jednou prošly tažičkou optických vláken, aby se z nich vyplavily nečistoty a scelila se jejich struktura. V závislosti na požadované vnitřní struktuře budoucího mikrostrukturního vlákna jsou užší křemenné tyče následně seskupeny

okolo křemenného jádra v jednu celistvou tyč viz obrázek 3. Prefabrikát lze tvarovat a tak se docílí různých hodnot profilu indexu lomu jádra. Po vytvoření křemenného prefabrikátu přichází na řadu běžná vláknová tažička, která se používá pro výrobu standardních telekomunikačních vláken.

Celý postup výroby je plně automatizován a důsledně kontrolován tak, aby mělo výsledné mikrostrukturní vlákno o stanoveném průměru požadovaný tvar. Tažení probíhá při teplotách od 1800°C do 2000°C. Při této teplotě má křemenné sklo velmi vysokou viskozitu. Aby nedošlo ke zborcení celé struktury mikrostrukturního prefabrikátu, je konec utěsněn a pomocí kompresoru tlakován. Změna poměru rychlosti tažení a teplota ohřevu mikrostrukturního prefabrikátu umožňuje vytvářet i velmi složité struktury vláken, a to v široké škále průměrů (v praxi od 2,5 do 125 μm). Aby se zabránilo oxidaci, je vlákno na konci výrobního procesu potaženo polymerovým ochranným pláštěm. Ten současně slouží i jako jeho mechanická ochrana. [3] [5]



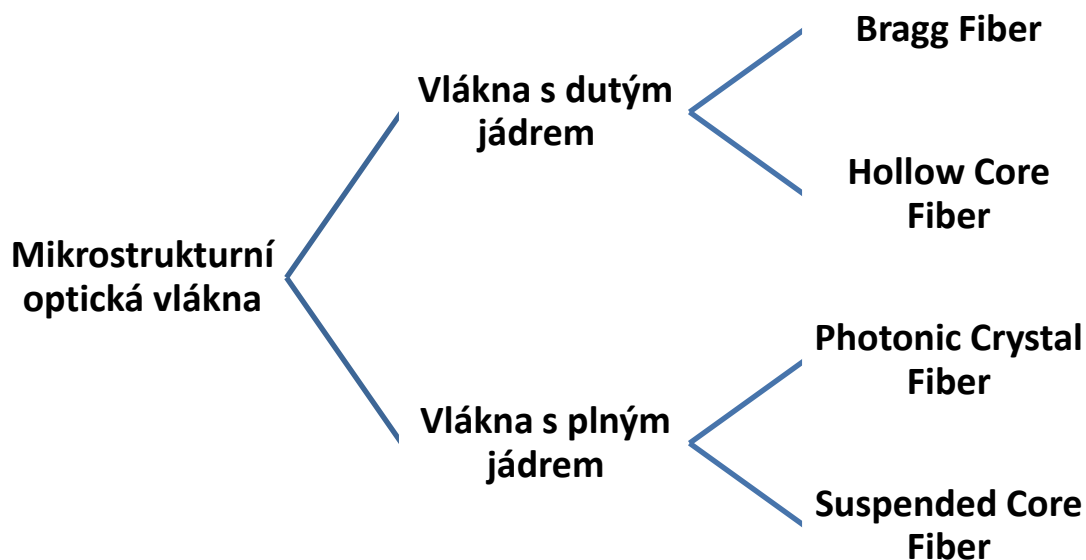
Obr. 3 Postup výroby mikrostrukturních optických vláken a tažení [5]

3. Typy mikrostrukturálních vláken

Výraz mikrostrukturální optické vlákno je výraz, který definuje všechna speciální optická vlákna, která mají vytvořenou vnitřní strukturu pomocí dutých kapilárních trubic. Vlákna se rozdělují podle typu jádra a principu šíření elektromagnetické vlny na dvě skupiny, jak je ukázáno na obrázku 4.

První skupina se skládá z vláken s „pevným jádrem“. Do této kategorie patří vlákna typu PCF (Photonic Crystal Fiber) viz kap. 4.1, vlákna SC-PCF (Suspended Core Photonic Crystal Fiber) viz kap. 4.2 a další.

Druhá skupina mikrostrukturálních vláken je charakteristická svým „dutým“ jádrem, často také nazýváno vzduchovým jádrem. Mezi představitele této kategorie lze zařadit vlákna typu HC-PCF (Hollow Core Photonic Crystal Fiber) viz kap. 4.3, nebo vlákna BPCF (Bragg Photonic Crystal Fiber) viz kap. 4.4 a další.



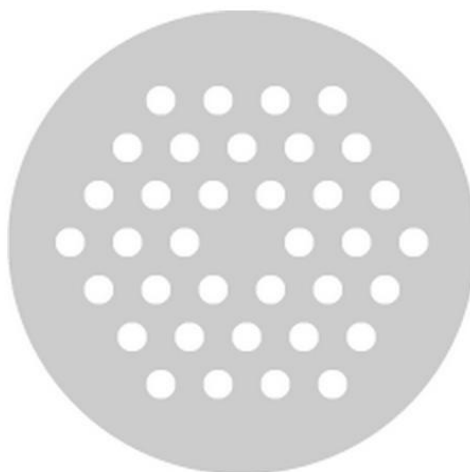
Obr. 4 Rozdělení mikrostrukturálních optických vláken

3.1 Photonic Crystal Fiber

Optické vlákno Photonic Crystal Fiber je tvořeno systémem vzduchových dutin kruhových průřezů v jádře vlákna. Nejčastěji používaná PCF struktura je tvaru šestiúhelníku (hexagonální) viz obrázek 5. Základním stavebním prvkem této struktury jsou kapilární trubice uspořádané do trojúhelníkové mřížky, které tvoří požadovaný šestiúhelníkový tvar.

Na rozdíl od klasických optických vláken, kde je přenos popsán Snellovým zákonem a kde dochází k odrazu optického paprsku na pevném rozhraní jádro-plášť, u PCF vláken, kde toto rozhraní není přesně definovatelné, je šíření světelného paprsku založeno na principu pozměněného principu indexu lomu. Ten je způsoben rozdílem mezi vyšším indexem lomu jádra, které je obklopeno oblastí tvořenou vzduchovými mikrostrukturami s nižším indexem lomu. Využití tohoto efektu umožňuje výrobu nekonečného jednovidového vlákna (Endlessly Single Mode Fiber).

Mezi další charakteristiky tohoto druhu vlákna patří nízká nelinearita a specifická chromatická disperse.



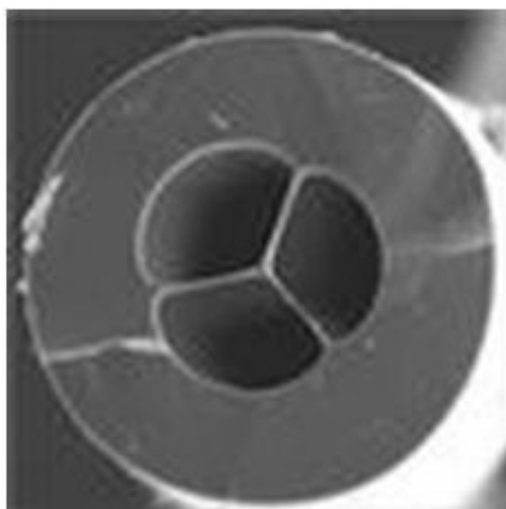
Obr. 5 PCF vlákno v řezu [11]

Vlákno je vyrobeno z oxidu křemičitého (SiO_2). Výrobci nabízejí vlákna jak s přesnými geometrickými vzory, jako např. trojúhelníkové, čtvercové, eliptické, kruhové, tak i s naprosto odlišnými, často až exotickými tvary, které jsou ve většině případů symetricky

rozmístěné podél jádra. Tak jako vzory, jsou i samotné mikrostruktury vyráběny v široké škále velikostí (jednotky až desítky μm) a tvarů (trojúhelníkové, eliptické, čtvercové atd.). Index lomu vlákna lze upravovat dopováním oxidu křemičitého. Jako dopanty se používají prvky vzácných zemin s vysokým indexem lomu (germanium, ytterbium). Počet mikrostruktur obklopujících jádro vlákna není přesně definován. Konkrétní vzory nejsou specifikovány žádným standardem. Tvar a velikost jednotlivých mikrostruktur se v samotném PCF vlákne může kombinovat pro docílení požadovaných parametrů. [2] [5] [7-9] [11-13]

3.2 Suspended Core Photonic Crystal Fiber

Suspended Core vlákno patří mezi novější zástupce mikrostrukturních optických vláken. Jeho první představení proběhlo v roce 2001[14]. V porovnání s ostatními jsou tato vlákna charakteristická tím, že mají okolo jádra z oxidu křemíku vytvořené větší vzduchové mikrostruktury (cca více než $30\mu\text{m}$ široké), které jsou obvykle tři, viz obrázek 6, a jsou od sebe odděleny nosnou přepážkou. Velikost jádra vlákna ovlivňuje útlum a nelinearitu vlákna. Se snižováním průměru jádra dochází ke snížení útlumu a zvýšení nelinearity vlákna.



Obr. 6 SCPCF vlákno v řezu [15]

S postupným vývojem SC-PCF vlákna se začalo experimentovat s různými geometrickými tvary, počtem a velikostí vzduchových mikrostruktur, které zatím nejsou dány žádnou technickou specifikací. Vlákna jsou za účelem dosažení specifických vlastností vyráběna s mikrostrukturami různých velikostí a tvarů, jako například trojúhelníkového nebo čtvercového průřezu.

Díky svému geometrickému tvaru a vlastnostem, lze tento druh vlákna s výhodou použít jako kapalinový nebo plynový senzor. Dutiny, díky své velikosti, umožňují snazší aplikaci detekovaných látek. [14-16]

3.3 Hollow Core Photonic Crystal Fiber

Vlákno typu Hollow Core je charakteristické jádrem se vzduchovou dutinou, obklopenou prstenci vzduchových kapilárních trubic. Geometrická struktura kapilár je obdobná jako u předchozích druhů vláken. Průměr jádra je obvykle konstruován v rozsahu 7x až 20x větším, než samotné mikrostruktury. Jádro je zároveň i osou vlákna viz obrázek 7. Výroba spočívá ve vynechání několika kapilárních trubic v ose vlákna, čímž vzniká dutina, jejíž velikost odpovídá počtu vynechaných kapilár. Pro výrobu kapilárních mikrostruktur se používá stejný materiál jako v předešlých případech, tj. SiO_2 . Přesná struktura HC-PCF není specifikovaná žádnou technickou dokumentací, a to ani rozmístění a velikost kapilárních trubic. Vzduchové dutiny ve vláknech mohou být různě široké a také se využívá kombinací různých tvarů.

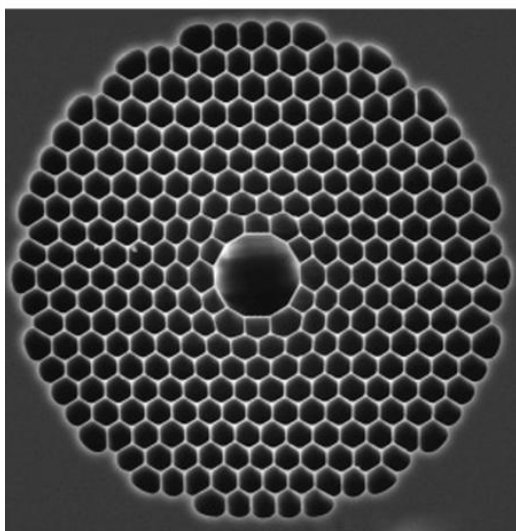
HC-PCF vlákna jsou zástupcem typu vláken, u nichž je princip přenosu definován takzvaným efektem optického zakázaného pásu. Ten je založen na fyzikálním mechanismu, kdy je periodická struktura pláště vlákna záměrně tvořena tak, aby měla vyšší index lomu, než jeho jádro. Světelný paprsek se nemůže vláknem šířit metodou úplného odrazu a to proto, že index lomu jádra je menší (index lomu jádra je roven indexu lomu vzduchu, tj. 1), než index lomu pláště (např. 1,45). Zakázaným optickým pásem se šíří pouze světelný paprsek určité vlnové délky a energie. Mimo to, vlákno není schopné signál přenášet. Tím, že je pouze malá část optické vlny šířena v materiálu vlákna, jsou významně potlačeny vlastnosti vyplývající z fyzikální interakce mezi světlem a materiálem vlákna. V závislosti na

průměru jádra vlákna je tak možné šířit vzduchem světelný paprsek, jehož až 95% energie je navázáno do vzduchového jádra. Tato vlastnost mimo jiné výrazně snižuje útlum vlákna. [8]

Obecně platí, ačkoliv to není pravidlem, že průměr jádra je jedna z rozhodujících veličin, která určuje, pro jaké vlnové délky přenášeného světelného paprsku bude vlákno použitelné [17]. HC-PCF vlákna s jádrem s průměrem řádově $20\mu\text{m}$ jsou určena pro vlnové délky v oblasti 1570nm . Vlákna s jádrem s menším průměrem $7,5\mu\text{m}$ jsou použitelná pro přenos paprsku o nižší vlnové délce, to je 820nm . Nejčastěji jsou vlákna typu HCPCF konstruována pro přenos světelného paprsku o vlnových délkách 820 , 1060 , 1550 , 1570 , nebo 2025nm .

Na výrobcem určených vlnových délkách mají tato vlákna téměř nulovou disperzi, odolávají ztrátám způsobených ohybem a extrémním teplotám jak vysokým, tak i nízkým.

Vlákna jsou využitelná v mnoha aplikacích. Jedná se například o úlohy, kdy je nutné přenášet optický paprsek o specifické vlnové délce. Umožňují přenos světelného paprsku velkého výkonu bez rizika poškození samotného vlákna. Vlákna mohou být také využívána v oblasti konstrukce detektorů plynů. [2-3] [5-12] [18-20]

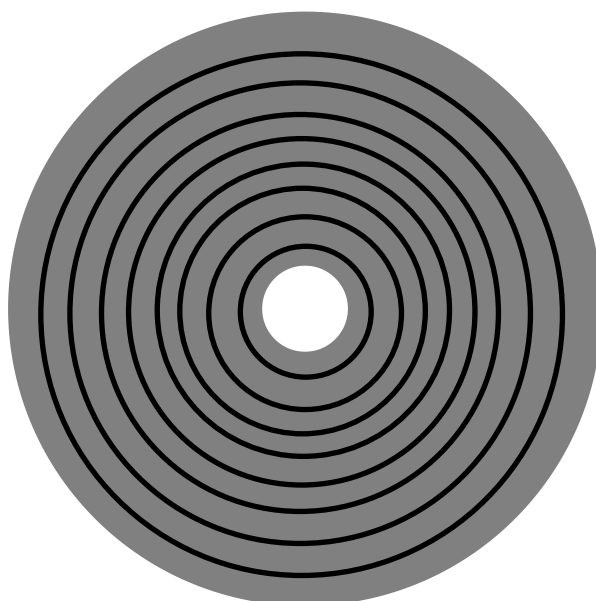


Obr. 7 HCPCF vlákno v řezu [10]

3.4 Bragg Photonic Crystal Fiber

Braggowské vlákno je tvořeno vzduchovým jádrem, které je obklopeno tenkými, periodicky se střídajícími vrstvami s rozdílným indexem lomu světla. Ideální konstrukce by sestávala z vrstev skla vzájemně oddělenými vrstvami vzduchu. Vzhledem k tomu, že tato konstrukce není mechanicky možná, bývají pro výrobu těchto vláken využívány vrstvy polymeru a chalkogenidového skla [2] [12]. Na obrázku 8 jsou patrné jednotlivé vrstvy. Tmavé s nižším indexem lomu světla, než vrstvy světlé. Počet vrstev je jedna z veličin určujících pracovní vlnovou délku vlákna. Při správné konstrukci vlákna, lze docílit vlastností, kdy bude 99,9% elektromagnetické vlny lokalizováno ve vzduchovém jádru [9]. Celkový útlum BPCF vláken je podobně nízký jako u Hollow Core a pohybuje se okolo 0,2dB/m. Braggovská vlákna vykazují nízkou chromatickou disperzi, menší než 1 ps/nm*km.

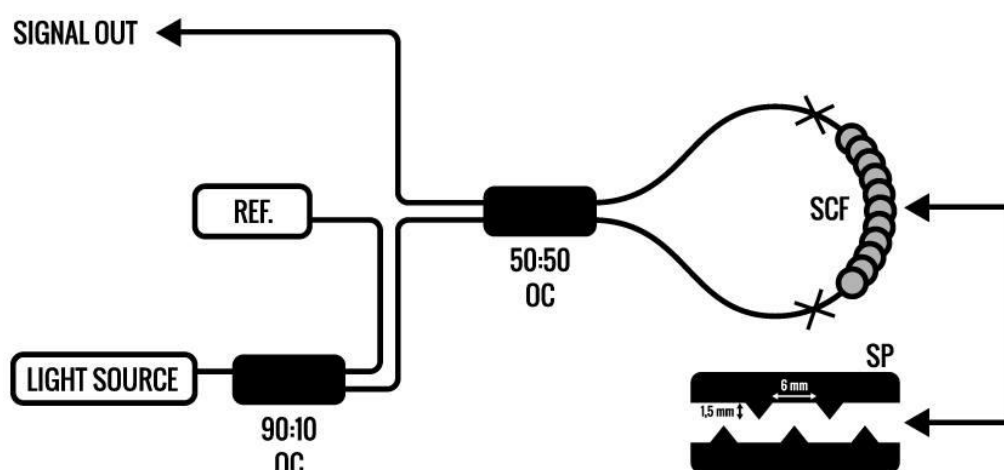
Základem výroby je vláknový prefabrikát, který se vyrábí válcováním vrstvy skla a to buď čistého, nebo dopovaného prvky vzácných zemin, na níž se poté nanese vrstva polymeru. Celý proces se opakuje až do vytvoření požadovaného počtu struktur. Takto vytvořený prefabrikát se vloží do klasické tažičky optických vláken a následuje již standardní postup, kde se ihned po přetavení nanese na vlákno ochranná vrstva laku v podobě tenkého filmu, aby vlákno na vzduchu neoxidovalo a nenasáklo vzdušnou vlhkost. [8-9] [12] [21]



Obr. 8 BF vlákno v řezu

3.5 Aplikace mikrostrukturních vláken

V posledních několika letech se na trhu začínají objevovat praktické aplikace využívající jedinečných vlastností mikrostrukturních optických vláken. Mezi tato zařízení patří například vláknové gyroskopické senzory, výkonové optické zesilovače, filtry, přepínače a mnohé další [2][11]. Jejich primární účel již zdaleka nepatří do aplikací či měření, jenž byly doposud doménou pouze výzkumných laboratoří či specializovaných pracovišť. Konstrukční vlastnosti mikrostrukturních vláken umožnily obohatit obor optiky o nové možnosti uplatnění, jichž by nebylo možno dosáhnout s dosud standardními prostředky a mnoho dalších aplikací je využíváno v oborech, které jsou na první pohled od optiky velmi vzdálené.



Obr. 9 Optický senzor polohy [22]

Mikrostrukturních vláken lze využívat mnoha způsoby. Pravděpodobně nejvýznamnější je v oblasti laserové techniky. Vláknová řešení našla uplatnění v konstrukci zdroje superkontinua (bílého laseru)[2][11][19], v Ramanově plynovém laseru[2], nebo v koherentním laserovém zdroji[2]. Tyto objevy následně umožnily praktické využití v mnoha oblastech.

Například s využitím koherentních laserů pracují systémy pro analýzu atomových vzorků, umožňující studovat pohyby atomů. V oblasti spektrometrie je využíváno snímání změn vlastností procházejícího světelného paprsku po aplikaci měřené látky. V oblasti biofotoniky je využíván zdroj superkontinua k osvětlování zkoumaných vzorků. Díky šíři jeho spektra v rozsahu 400-2400nm, umožňuje použití procesů filtrace určitých vlnových délek k získání požadovaného obrazu. Schopností přenosu širokého světelného pásma se využívá v lékařství a biologii. [2][11][19]

V oblasti měření byla využita mikrostrukturní vlákna k vývoji systému pro měření kmitočtu s vysokou přesností pomocí kmitočtového hřebenu (Theodor Hänsch, Nobelova cena 2005) [2].

Při měření fyzikálních veličin, detekce kapalin a plynů se využívá zejména toho, že vlákna mají konstantní vnitřní strukturu vytvořenou po celé své délce [24]. To umožňuje detekovat i nepatrné změny parametrů působících na vlákno. Kromě již zmiňované detekce kapalin a plynů je těchto vlastností využito při konstrukci tlakových, vibračních a dalších druhů mechanických senzorů [13]. Mikrostrukturní optická vlákna lze využít i k vyhodnocení distribuovaných měření. Jsou využitelná pro konstrukci gyroskopických senzorů, průtokoměrů, nebo na akcelerometrická měření.

Společně s rozvojem komerčních aplikací rostou i požadavky na výrobu zařízení pro laboratorní, experimentální a další úzce specifické účely v oblasti optoelektroniky. Za tímto účelem jsou využívány vlastnosti mikrostrukturních vláken, pomocí kterých jsou konstruována zařízení pro kmitočtovou konverzi, konverzi mezi rozdílnými druhy vláken, pásmové, nelineární a 3D filtry, pásmové zábrany, výkonové děliče a další [2][11].

Photonic Crystal Fiber se využívají ve vláknových laserech či interferometrech. Dále našla uplatnění v nelineární a kvantové optice. Lze je použít také jako filtry či přepínače. V neposlední řadě jsou také vhodná do oblastí optického snímání a měření fyzikálních veličin.

Hollow Core vlákna našla uplatnění v Ramanových plynových laserech, optických vláknových gyroskopech a zdrojích krátkých pulsů a v endoskopických aplikacích [13]. V oblasti detekce lze využít nejen vzduchové jádro, ale i mikrostruktury okolo něj, jako prostor pro aplikaci kapalného, nebo plynného analytu. Vlákno lze využít také k měření fyzikálních veličin. [19]

Suspended Core vlákna jsou využívána, obdobně jako předešlé typy mikrostrukturních optických vláken, v širokém spektru měření a detekce[23]. Z konvenčních aplikací lze tato vlákna najít v laserech a jsou využívána ve spektroskopické a nelineární optice. Na obrázku 9 je zobrazeno schéma zapojení SCPCF vlákna jakožto velmi přesný senzor polohy pracující jako Sagnacův interferometr [22]. Tato vlákna se také používají ke konstrukci optických mikrofonů, nebo nepřímo měřených veličin, jako je např. rychlost nebo zrychlení.[20]

Braggovo vlákno se nejčastěji používá v průmyslových nebo lékařských aplikacích pro přenášení širokého spektra světelného paprsku např. v zařízeních pro endoskopická vyšetření[8]. Tento druh vlákna má své uplatnění i v laserové technice, převážně v oblasti pikosekundových a vysoce výkonových laserů, [21]

4. Simulace

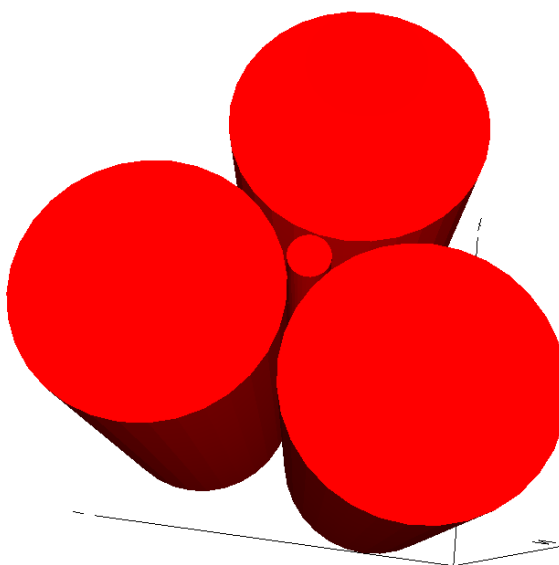
Praktickému experimentálnímu měření předcházely simulační výpočty. Ty podaly informace o chování mikrostrukturních optických vláken naplněných analyzovanou kapalinou. Díky nim vznikla i citlivostní analýza. Součástí provedených simulací bylo také stanovení vhodné vlnové délky pro co nejširší škálu měřených kapalin. Pro účely simulace byl vybrán počítačový software BeamProp od firmy Synopsys, který je vhodný pro popis vláknové optiky.

Vstupní simulační parametry jsou:

- 1) Mikrostrukturní vlákna Suspended Core (kap. 4.1) a Endlessly Single Mode 12B (ESM-12B), jenž je druh Photonic Crystal Fibers (kap.4.2)
- 2) Vlnová délka (850, 1310, 1550 a 1610nm)
- 3) Index lomu prostředí od 1,33 do 1,43

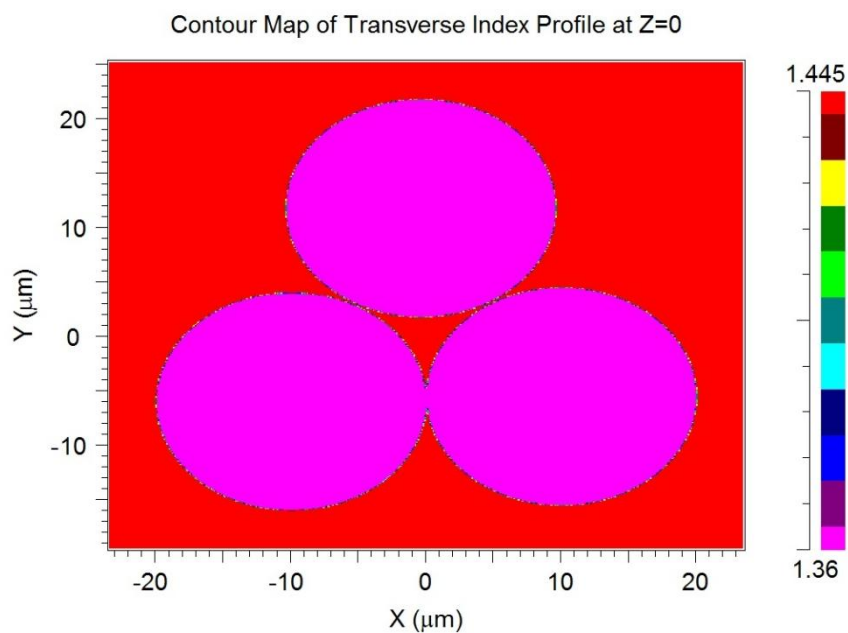
4.1 Simulace Suspended Core

Simulační model vlákna Suspended Core je zobrazen na obrázku 10. Model se skládá z jádra o průměru $2,8\mu\text{m}$ a třech mikrostrukturních kapilár o průměru $20\mu\text{m}$ rozmístěných okolo jádra tak, aby tvořily charakteristické nosné příčky. Index lomu jádra je 1,445 a index lomu dutin je proměnný v závislosti na použitém analytu.



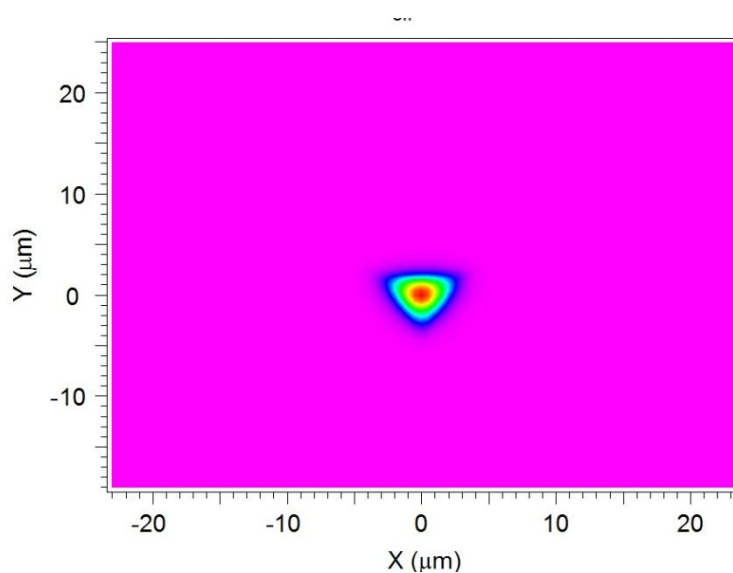
Obr. 10 Simulační model Suspended Core

Na obrázku 11 je zobrazeno nastavení profilu indexu lomu modelu vlákna. Z výsledku je patrné, že kapilární dutiny mají index lomu 1,36. To představuje z reálných kapalin například etanol. Jádro, můstky a okolní materiál má index lomu 1,445.



Obr. 11 Výsledek simulace Display material profile

Dalším krokem bylo simulováno a zaznamenáváno množství energie optického signálu procházejícího vláknem. Na obrázku 12 je zobrazena ukázka profilu stopy pole.

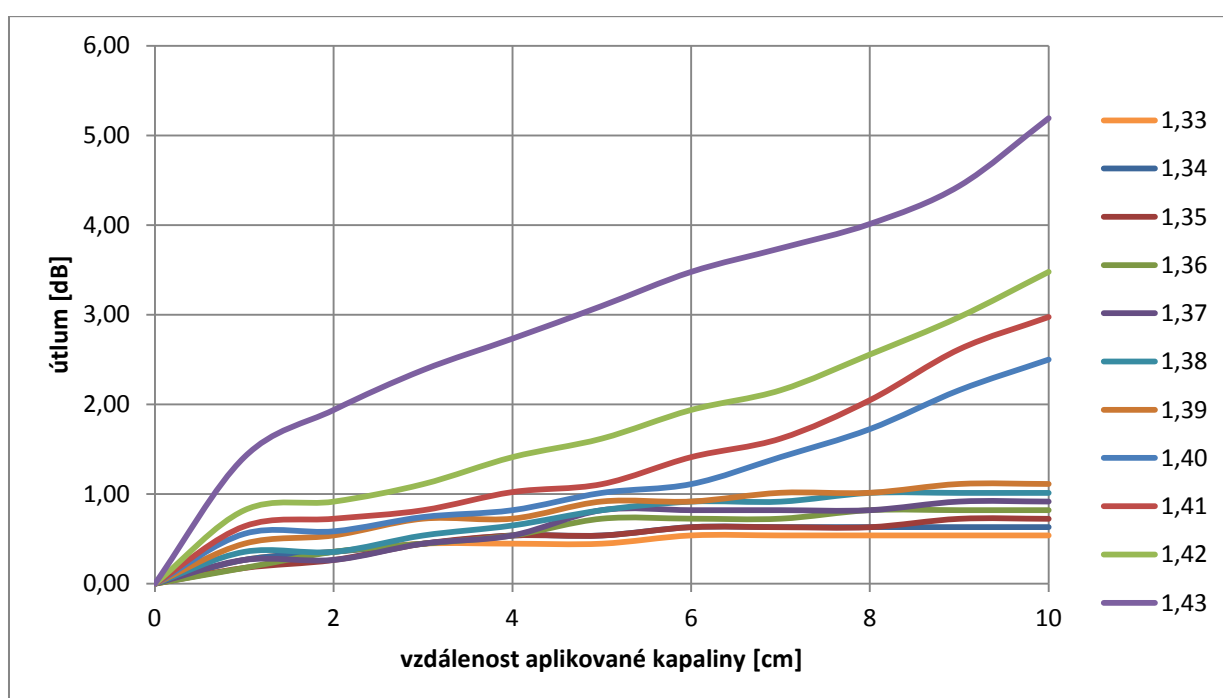


Obr. 12 Profil stopy pole modelem Suspended Core

4.1.1 Výsledky simulací vlákna Suspended Core

Simulace Suspended Core vlákna byla prováděna pro 4 různé vlnové délky 850, 1310, 1550 a 1610nm. Úkolem bylo zjistit vliv útlumu vlákna na jeho délku při různých indexech lomu mikrostruktur. Veškeré simulace byly prováděny na vláknech délky 10cm. Výsledky pro jednotlivé budící zdroje jsou graficky uvedeny níže. Detailní hodnoty jsou v tabulkách v příloze.

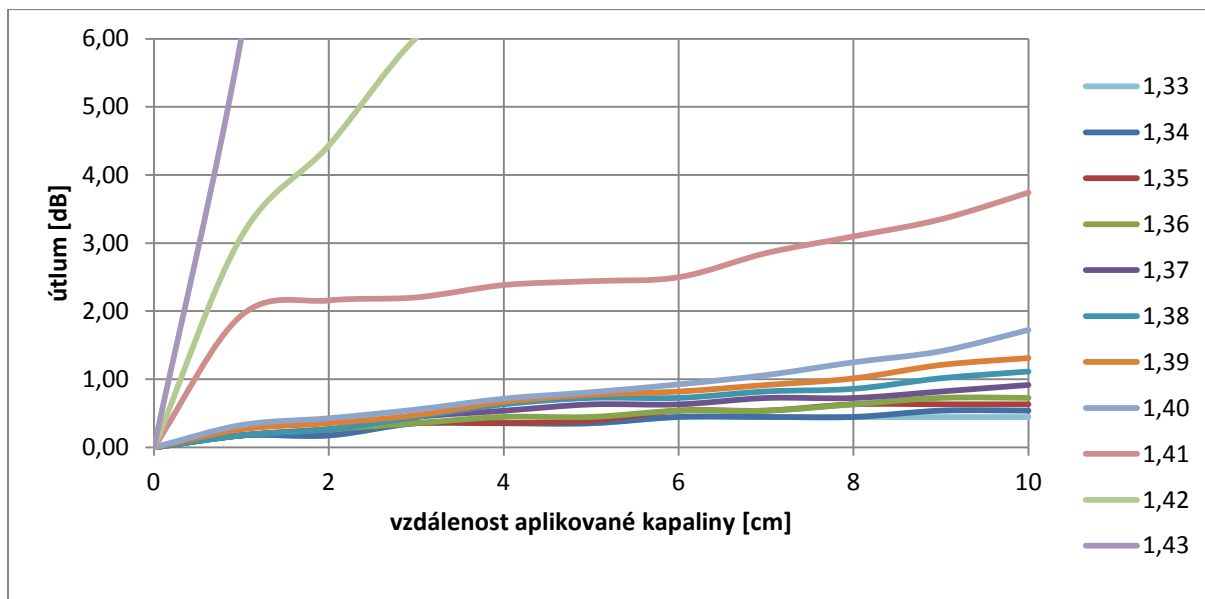
Závislost útlumu na vzdálenosti SC-PCF pro vlnovou délku 850nm je uvedena na obrázku 13.



Obr. 13 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 850nm

Z grafu na obrázku 13 je patrné, že indexy lomu kapalin (1,33-1,39) při použití zdroje pracujícího na vlnové délce 850nm nejsou navzájem příliš kontrastní. Vlákno s mikrostrukturami uvedených indexů lomu nevykazuje výrazný rozdíl útlumů, což by při prováděné detekci neznámé kapalné látky nemuselo vést k jednoznačnému rozlišení. Pouze útlum signálu procházejícího vláknem s mikrostrukturami o indexu lomu od 1,40 do 1,43, se výrazně odlišuje od ostatních výsledků měření.

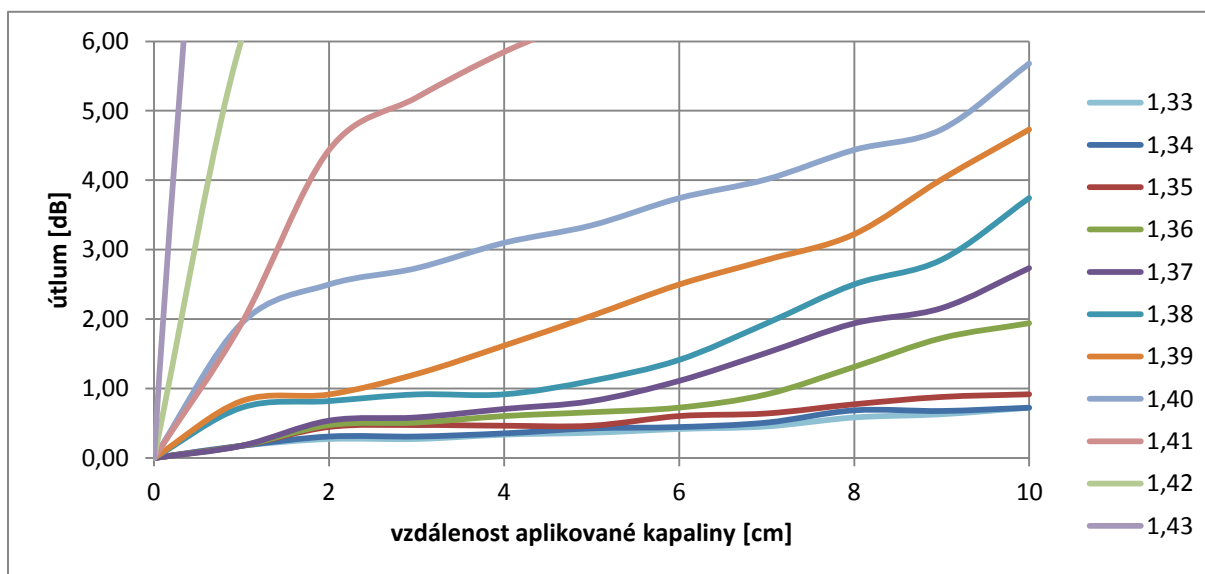
Závislost útlumu na vzdálenosti SC-PCF pro vlnovou délku 1310nm je zobrazena na obrázku 14.



Obr. 14 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1310nm

Výsledky provedené simulace se zdrojem světelného signálu o vlnové délce 1310nm mají lepší výstupy než v předcházejícím případě. To znamená, že pro provádění detekce látek je při této vlnové délce použitelný index lomu analytu od 1,37 do 1,43 v případě aplikace detekované látky v délce 10 cm.

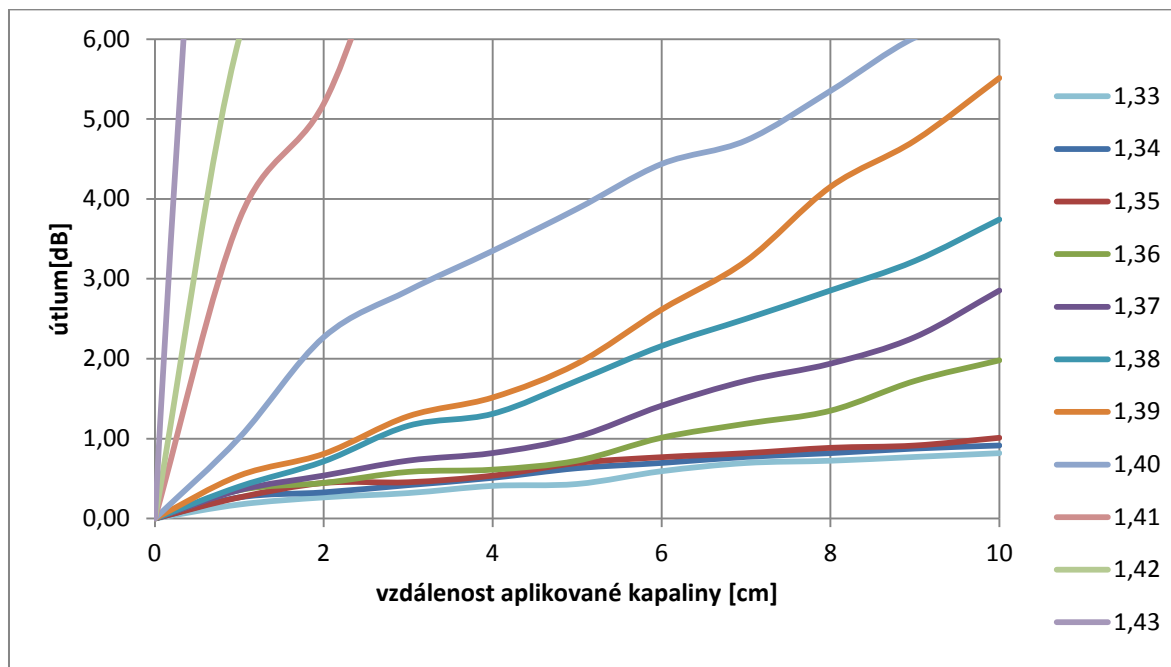
Závislost útlumu na vzdálenosti SC-PCF pro vlnovou délku 1550nm pak ilustruje obrázek 15.



Obr. 15 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1550nm

Použití světelného signálu o vlnové délce 1550nm při délce aplikované látky ve vzdálenosti 10cm již umožňuje provádět detekci v rozsahu od 1,36 do 1,43.

Závislost útlumu na vzdálenosti SC-PCF pro vlnovou délku 1610nm je demonstrována na obrázku 16.



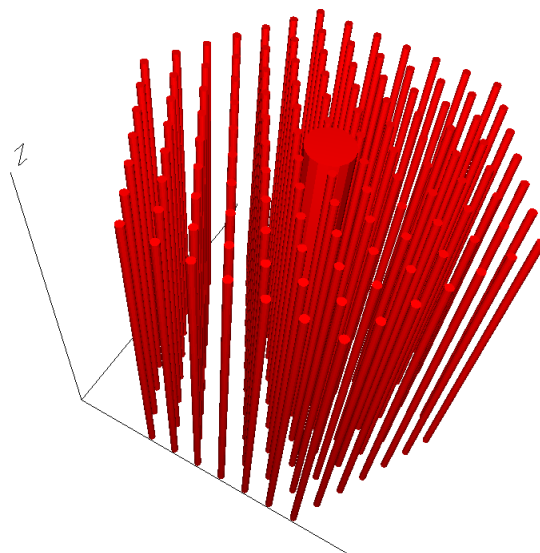
Obr. 16 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1610nm

Použití světelného signálu o vlnové délce 1610nm při délce aplikované látky ve vzdálenosti 10cm umožňuje provádět detekci v plném rozsahu od 1,36 do 1,43.

Z výsledků simulovaných měření vyplývá, že vlnová délka procházejícího světelného signálu významně ovlivňuje dynamiku detekce. Při zachování stanovené délky aplikace kapalně látky 10cm a použitých vlnových délkách je omezena možnost provádění měření pro rozsahy indexů lomu mikrostruktur od 1,36 do 1,43.

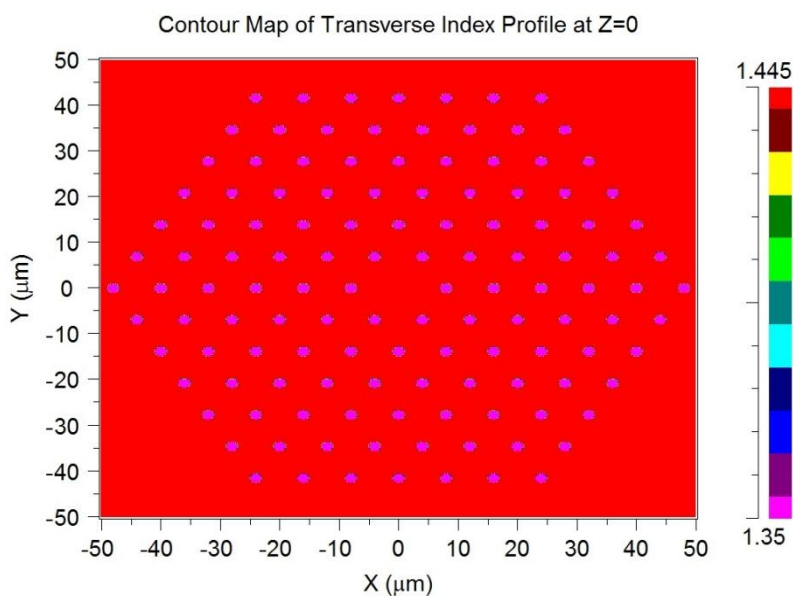
4.2 Simulace Endlessly Single Mode 12B

Simulační model vlákna Endlessly Single Mode 12B je zobrazen na obrázku 17. Skládá se z jádra o průměru $12\mu\text{m}$ a 126 mikrostrukturálních kapilár o průměru $2\mu\text{m}$. Index lomu jádra je 1,445 a index lomu dutin je proměnný v závislosti na použitém analytickém vzorku.



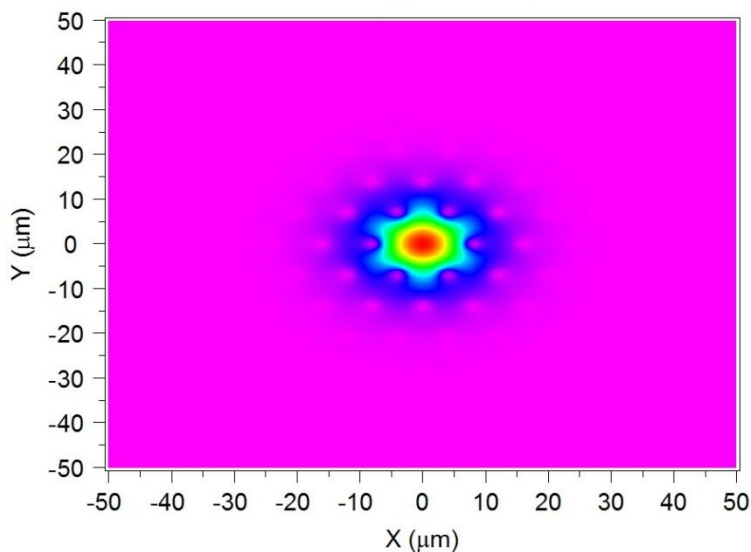
Obr. 17 Simulační model Endlessly Single Mode 12B

Na obrázku 18 je zobrazeno rozložení profilu indexu lomu. Z nastavení je patrné, že prostředí a jádro má index lomu 1,445 a mikrostrukturální dutiny pak 1,35.



Obr. 18 Výsledek simulace Display material profile

Simulačním programem byl jako v předešlém případě zaznamenáván výkon signálu šířící se mikrostrukturním modelem. Na obrázku 19 je zobrazena ukázka profilu stopy pole.

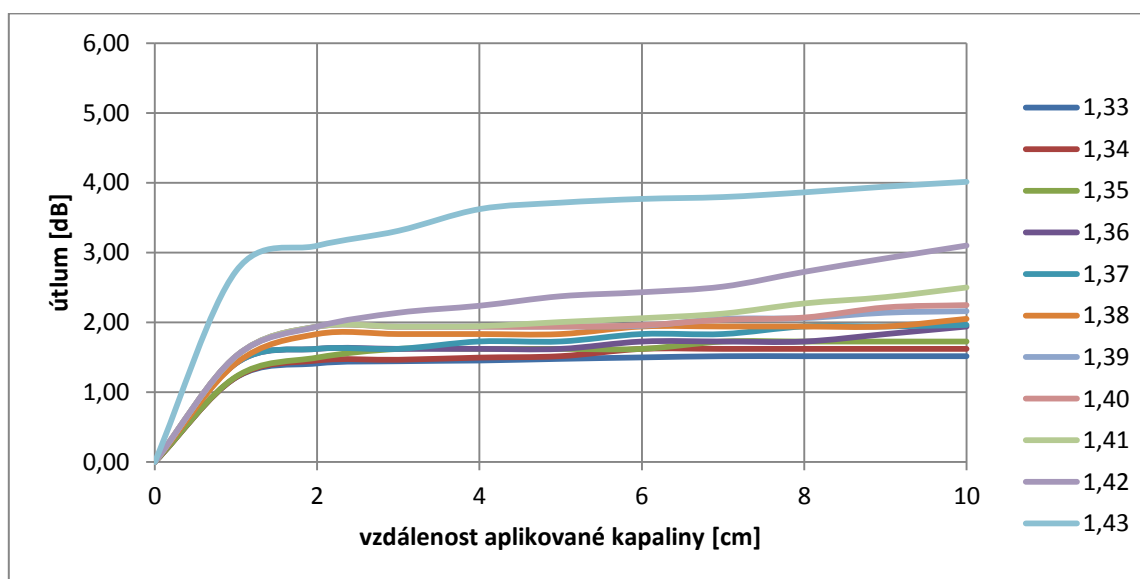


Obr. 19 Profil stopy pole Endlessly Single Mode 12B

4.2.1 Výsledky simulací Endlessly Single Mode 12B

Simulace vlákna Endlessly Single Mode 12B byla prováděna za stejných podmínek jako vlákno Suspended Core.

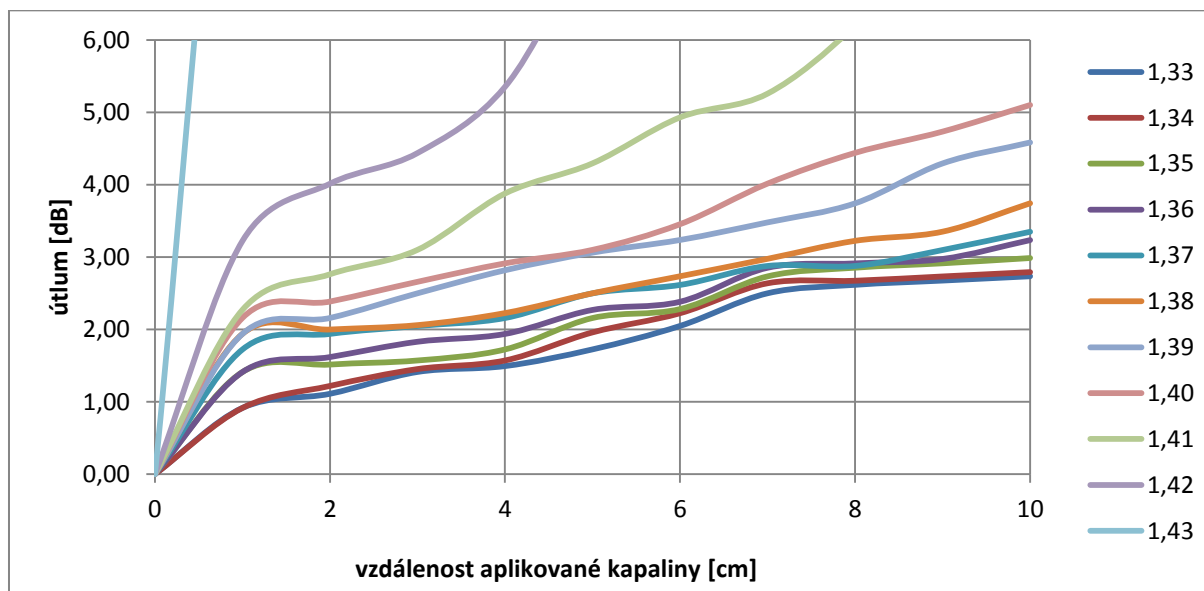
Závislost útlumu na vzdálenosti ESM-12B pro vlnovou délku 850nm je zobrazena na obrázku 20.



Obr. 20 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 850nm

Z grafu je patrné, že indexy lomu kapalin (1,33-1,40) při použití zdroje pracujícího na vlnové délce 850nm nejsou navzájem příliš kontrastní. Pro detekci lze použít rozsah indexů lomu od 1,41 do 1,43.

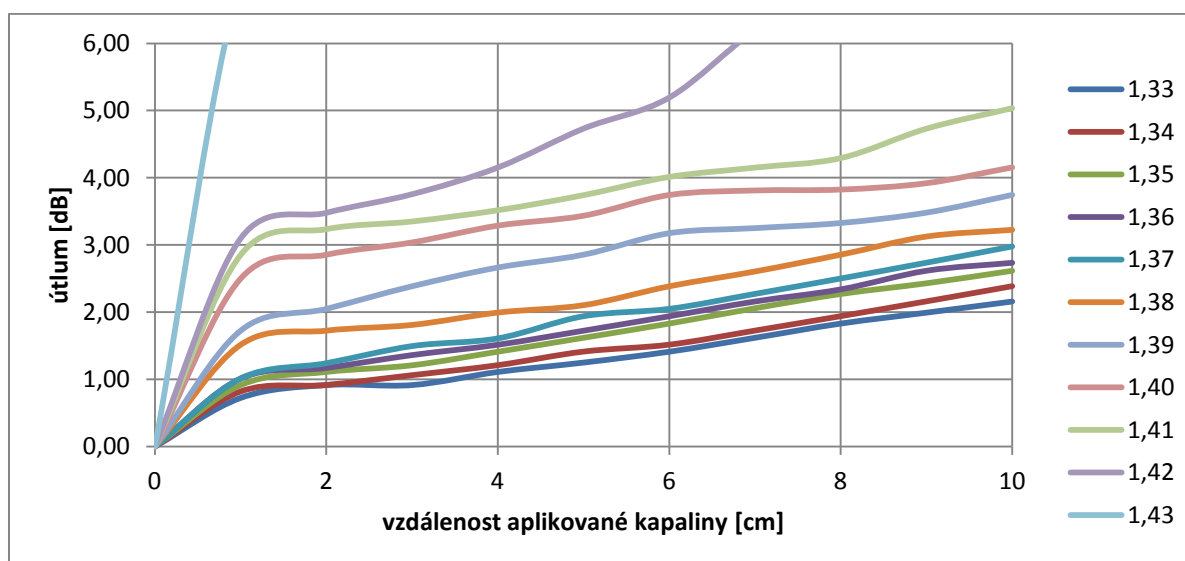
Závislost útlumu na vzdálenosti ESM-12B pro vlnovou délku 1310nm je demonstrována na obrázku 21.



Obr. 21 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1310nm

Využitelný rozsah indexů lomu při vlnové délce 1310nm a aplikaci látky v délce 10 cm je 1,39 až 1,43.

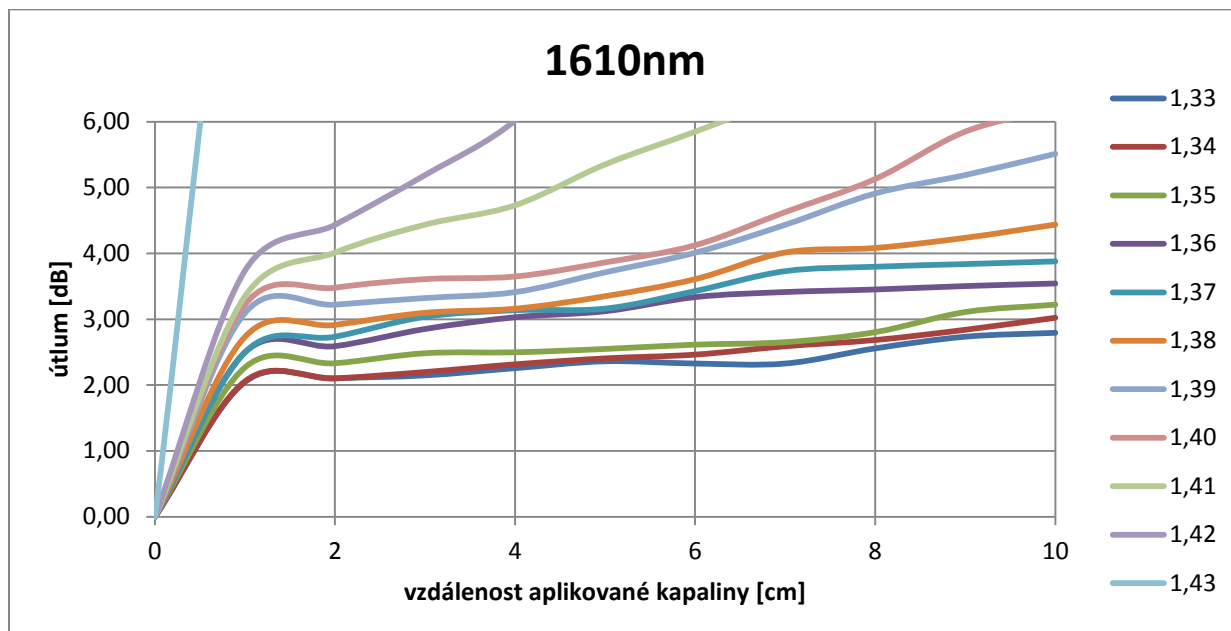
Závislost útlumu na vzdálenosti ESM-12B pro vlnovou délku 1550nm pak ilustruje obrázek 22.



Obr. 22 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1550nm

Využitelný rozsah indexů lomu při vlnové délce 1550nm a při aplikaci látky v délce 10cm je 1,38 až 1,43.

Závislost útlumu na vzdálenosti ESM-12B pro vlnovou délku 1610nm pak ilustruje obrázek 23.



Obr. Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1610nm

Využitelný rozsah indexů lomu při vlnové délce 1610nm a při aplikaci látky v délce 10cm je 1,38 až 1,43.

Z výsledků simulovaných měření vyplývá, že optická vlákna typu Suspended Core jsou pro provádění detekce neznámých kapalných látek dle stanovených požadavků výhodnější, než vlákna typu Endlessly Single Mode 12B. U provádění simulačních analýz s vlákny typu SC-PCF byl detekovatelný index lomu v rozsahu od 1,36 do 1,43. Rozdíl použitelných indexů lomu není na všech použitých vlnových délkách výrazný, ale na základě zpracovaných výsledků se ukazuje, že u vláken typu SC-PCF lze jednotlivé hodnoty lépe rozlišit, než u ESM-12B. Simulační analýza byla provedena na mikrostrukturních vláknech délky 10cm. Z analyzovaných grafů vyplývá, že pro optimální měření stačí délka detekčního vlákna 6cm.

5. Experimentální část

5.1 Příprava měření

Před prováděním samotné experimentální detekce je nutné určit a stanovit základní podmínky měření. Prvním potřebným úkolem je určit a otestovat postup, jakým se budou mikrostruktury vlákna plnit. Obdobný problém vzniká i při opačném postupu, tedy při čištění mikrostruktur, aby následné měření nebylo ovlivněno zbytky předešlého analyzovaného vzorku. Průměr mikrostruktur je v řádu jednotek až desítek mikrometrů, proto budou tyto postupy pro experiment zásadní.

Čištění vlákna lze řešit několika možnými způsoby. Může to být nové zalomení vlákna, čištění průplachem nebo ještě jednodušeji a to prostým nahrazením novým vláknem. Nejvhodnější pro aplikaci měřených kapalin jsou vlákna typu Hollow Core a Suspended Core, protože disponují širokými vzduchovými otvory (desítky μm), které lze jednodušeji plnit. Prosté nalití kapaliny do mikrostruktur nemusí fungovat, proto je zapotřebí zvážit jiné postupy, či komplexnější využití aplikačních přístrojů.

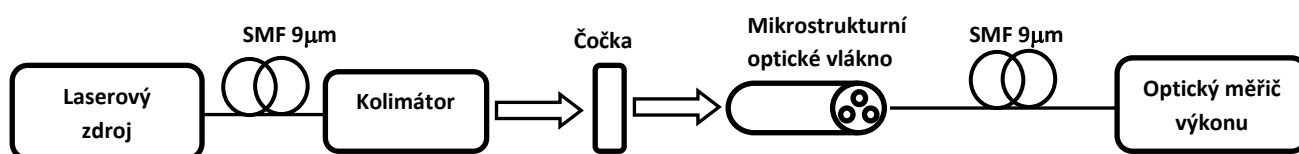
Jako další krok je nutné stanovit způsob buzení vlákna a vyhodnocení naměřených hodnot. V úvahu se musí vzít možnosti zapojení a možné chyby, které by mohly vzniknout při navázání signálu či z důvodů dalších vnějších vlivů.

Pro měření lze použít jednu z následujících metod:

První metoda spočívá v přenosu optického signálu volným prostorem, neboli FSO (Free Space Optic). Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 24. Princip spočívá v navázání signálu z budícího laserového zdroje do vlákna pomocí fokusačního aparátu složeného z čočky a kolimátoru. Výhodou metody optiky volným prostorem je jednoduchá výměna měřených vzorků bez náročného rozpojování celé měřicí sestavy. Nevýhodou je samotný fokusační aparát. Po každém vyjmutí vlákna z měřicího systému je nutné vždy fokusovat paprsek a ladit celý systém. Podobné měření bylo představeno zaměstnanci čínské univerzity Jiliang v roce 2011 na elektricko-optické konferenci. [25]

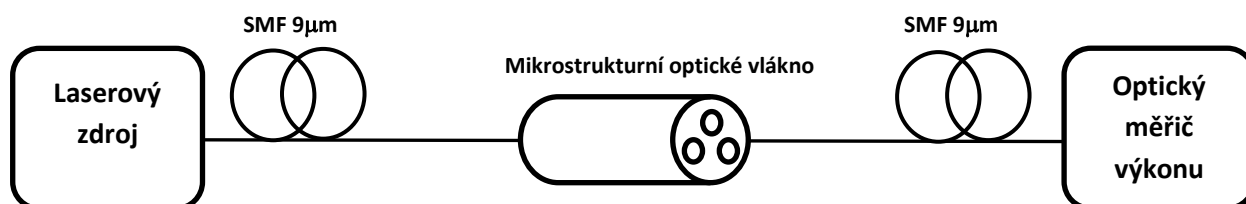
Jako druhý možný způsob měření se nabízí přímé spojení mikrostrukturního vlákna s klasickým jednovidovým vláknem. Schéma zapojení je na obrázku 25. Absenci fokusačního

aparátu zde nahradilo předřadné jednovidové vlákno (SMF - Single Mode Fiber). Napojení vláken na sebe lze provádět pomocí rychlospojek, které z důvodu možné vnášené chyby nejsou pro laboratorní měření příliš vhodné. Druhý způsob spojení mikrostrukturního vlákna se SMF lze za provést pomocí optické svářečky. Tento způsob vytváření nerozebratelných spojů představili v roce 2011 zaměstnanci Miditerranen Technology Parku ze Španělska [26].



Obr. 24 Schéma zapojení přenosu signálu ve volném prostoru

Porovnáním složitosti přípravných prací k provedení samotného měření a posouzením možných rizik, zejména při sváření kapalinou naplněného mikrostrukturního vlákna, bylo rozhodnuto, že experimentální detekce bude provedena první metodou, tj. optikou volným prostorem s vlákny Suspended Core a Endlessly Single Mode 12B.

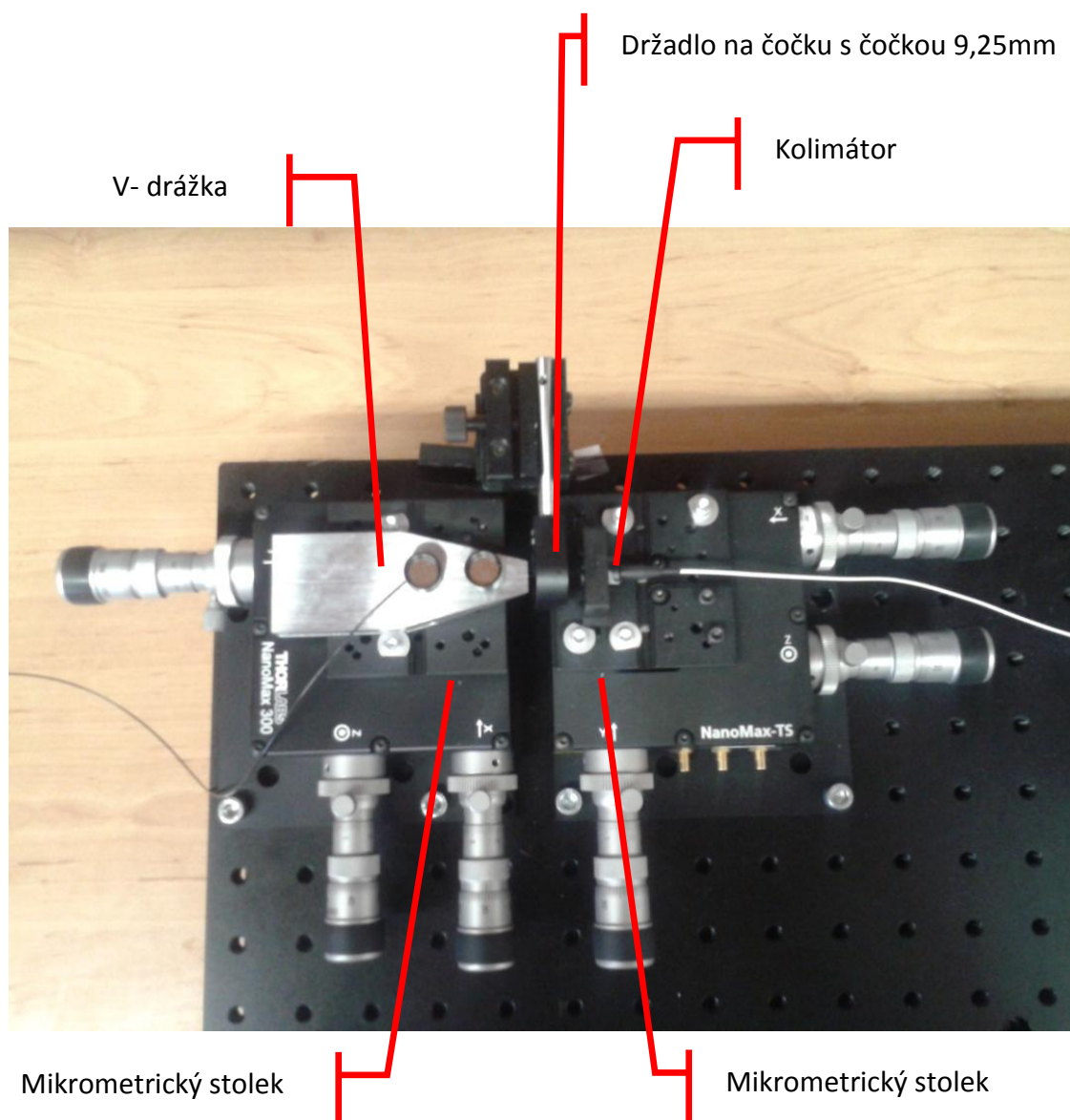


Obr. 25 Schéma zapojení přímého spojení PCF a SMF

Výsledky detekce analytu jsou založeny na principu porovnání naměřené hodnoty po jeho aplikaci s hodnotou referenční. Za referenční hodnotu se považuje hodnota, kdy v mikrostrukturách vlákna není žádná kapalina ani plyn, respektive dutiny jsou naplněny vzduchem. Analyt bude ovlivňovat šíření elektromagnetické vlny vláknem z důvodu rozdílných indexů lomu, kterými kapaliny použité k měření disponují. Naměřené hodnoty budou vyhodnocovány optickým měřičem výkonu. [27]

5.2 Popis měřící sestavy

Experimentální měřící sestava byla sestavena z V-drážky, kolimátoru, fokusační čočky a z dvojice nosných 3D mikrometrických stolků polohovatelných výškově, šířkově i podélně. Celé zapojení je zobrazeno na obrázku 26. Blokové schéma je pak na obrázku 26.

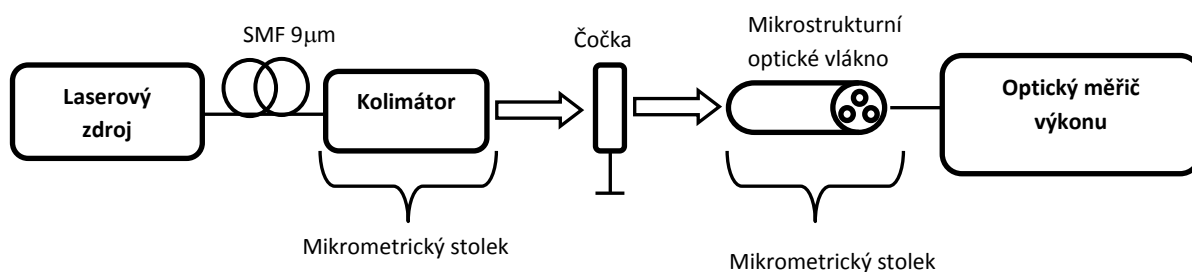


Obr. 26 Experimentální měřící sestava

K buzení mikrostrukturálních optických vláken byla zapotřebí dvojice laserových zdrojů. První použitý laserový zdroj, čtyřkanalový CoBrite DX 4, vyrobený firmou ID Photonics

(obrázek 28), disponuje výstupy laditelnými v C a L pásmu v rozsahu od 1528 do 1607nm a proměnným výstupním výkonem od 6 do 16dBm. Druhý zdroj byl šesti kanálový, s výstupy na pevných vlnových délkách 1310, 1470, 1490, 1550 a 1570nm. Každý samostatný kanál má svůj specifický neměnný výstupní výkon. U tohoto zdroje byl použit pouze jeden kanál a to kanál pracující na vlnové délce 1310nm, kterým předchází laserový zdroj nedisponuje. Výstupní výkon je pak 2,5 dBm.

Za laserovým zdrojem následuje kolimátor, ten je již pevně uchycen na polohovatelném mikrometrickém stolku. Jeho úkolem je soustředit světelný paprsek za pomoci kulové čočky o průměru 9,25mm do středu mikrostrukturního vlákna, na jehož opačném konci je přes rychlo konektor připojen optický měřič výkonu PM100D od firmy ThorLabs (obrázek 29).



Obr.27 Schéma zapojení měřící soustavy



Obr. 28 Laserový zdroj CoBrite DX 4



Obr. 29 Optický měřič výkonu PM 100D

5.3 Naladění měřicí sestavy

Pro dosažení přesných výsledků je nutné celý měřicí aparát správně nastavit. Před samotným měřením proběhla řada pokusů, aby se našla správná poloha mikrometrických stolečků vůči fokusační čočce. Prvé experimenty byly prováděny na standardním jednojádřovém vlákně o průměru vidového pole $9\mu\text{m}$. Experimenty s navazováním signálu do tohoto vlákna ukázaly, že navázat signál do vlákna je časově náročný úkol, který může být ještě těžší při použití mikrostrukturálního vlákna typu Suspended Core o průměru jádra $2,8\mu\text{m}$.

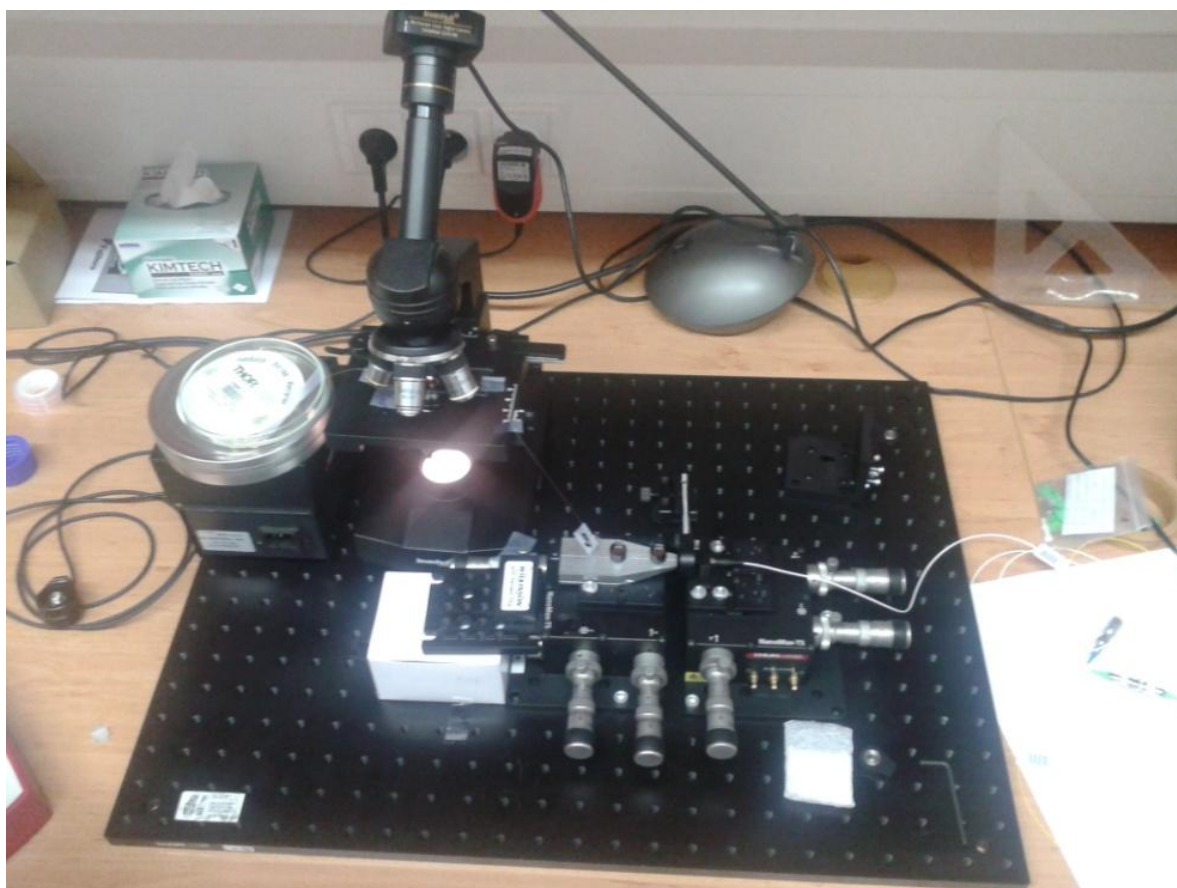


Obr. 30 Detail navazování signálu do SMF vlákna

Kolimátor a V-drážka pro uchycení analyzovaného vlákna jsou připevněny na samostatném 3D mikrometrickém stolečku umožňujícím posun ve všech třech osách s přesností v řádu nanometrů. Mezi nimi je umístěna na vlastní stojce fokusační čočka

kulovitého tvaru. Kulovitá vlastnost čočky umožňuje její umístění mezi stolky v náhodném úhlu otočení, proto není zapotřebí s ní manipulovat a ladit do přesných úhlů viz obrázek 30.

Správný průměr čočky byl určen experimentálně na základě několika podrobných měření. Byly provedeny pokusy s třemi čočkami o průměru 3, 6 a 9,25mm. Experimenty prokázaly, že se všemi čočkami lze dosáhnout na výstupu vlákna téměř stejného referenčního optického výkonu a to jak s použitím klasického telekomunikačního tak i mikrostrukturního. Jejich jediný znatelný rozdíl byl v době, která byla nutná k ladění mikrometrických stolečků, aby se správně navázal signál do vlákna. Z výsledků vyplynulo, že k experimentu bude použita čočka o průměru 9,25mm, protože navázání signálu do vlákna s touto čočkou je z časového hlediska nejvýhodnější. Na obrázku 31 je zobrazena naladěná experimentální měřicí sestava.

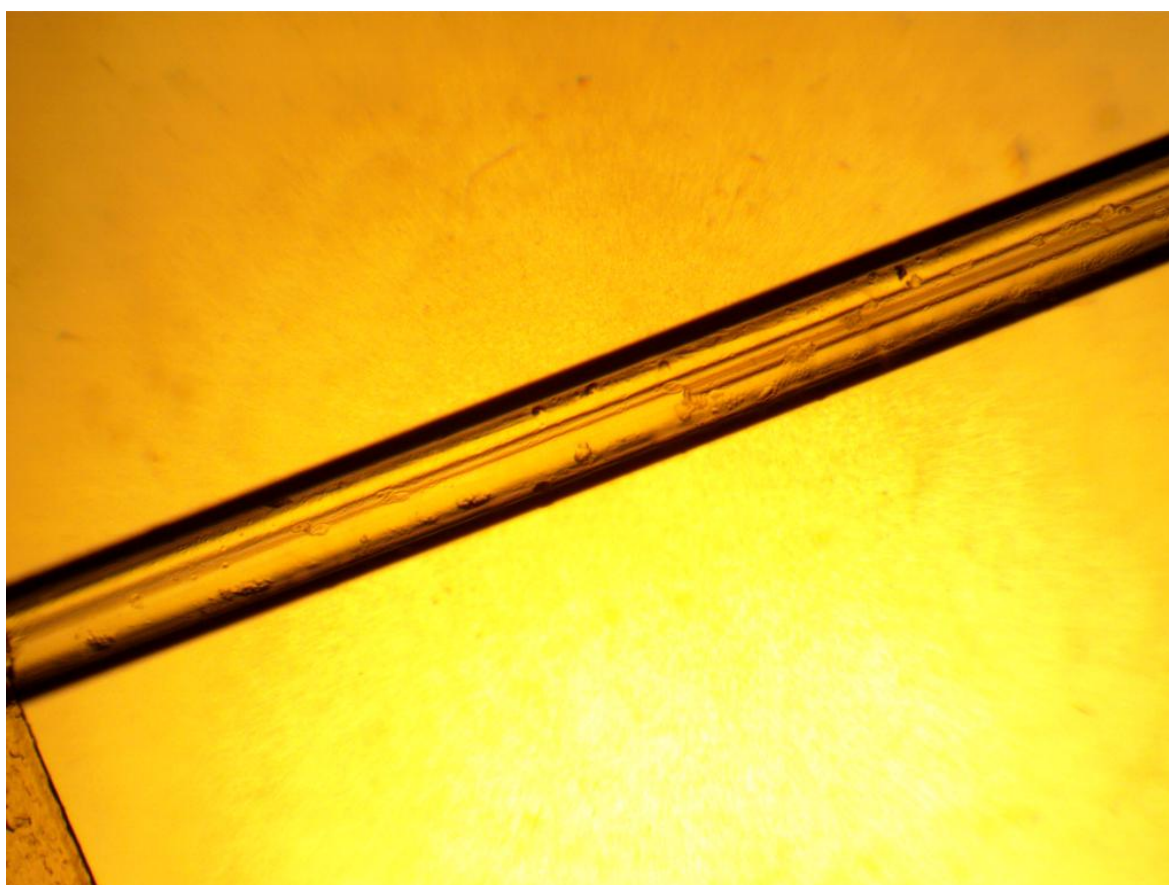


Obr. 31 Měřicí sestava s mikroskopem

5.4 Aplikace měřených vzorků kapalin do mikrostrukturních vláken

Metoda zvolená pro tyto experimenty spočívá ve fyzikálním principu kapilárního jevu. Princip je založen na ponoření jednoho konce optického vlákna obsahujícího mikrostrukturní kapilární dutiny do měřeného vzorku kapaliny a druhý konec vlákna se nechá volně položený. Kapilární tlak působící na vnitřní stranu kapilární dutiny optického vlákna se snaží vyrovnat hydrostatickému tlaku a dochází tím ke vztlínání kapaliny neboli kapilární evalvací. Metoda využívající kapilární jevy má i své omezení a proto ji nelze použít pro všechny druhy kapalin. Sloupec hladiny kapaliny v kapiláře vlákna stoupá jen v případě, že měřený vzorek smáčí stěnu nádoby, ve které je umístěn. V opačném případě, kdy kapaliny nesmáčejí stěny nádoby, dochází ke kapilární depresi.

Pro laboratorní měření byly vybrány vzorky isopropylalkoholu (IPA) a etylalkoholu (ETOH). Oba vzorky smáčely stěnu nádoby, proto aplikace do mikrostruktur vlákna byla snadná. Na obrázku 32 je zobrazen navzlínaný vzorek isopropylalkoholu do vlákna Suspended Core.

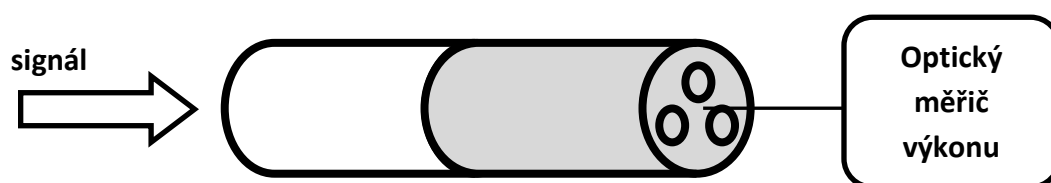


Obr. 32 Navzlínaný isopropylalkohol v SC-PCF vláknu

5.5 Postup měření

Experimentální měření probíhalo ve dvou krocích. Jeden konec zalomeného a vyčištěného mikrostrukturního vlákna byl založen do V-drážky. Druhý zalomený a vyčištěný konec byl připojen k optickému měřiči výkonu. Pomocí polohovatelných šroubů na mikrometrickém stolečku se nastavilo čelo vlákna do středu fokusační čočky tak, aby bylo dosaženo co největšího navázání výkonu do vlákna. Z maximální dosažené hodnoty se stanovil referenční výkon.

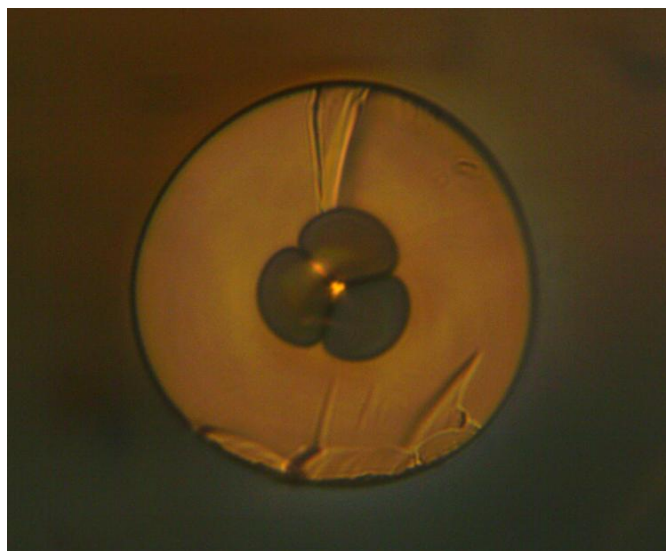
Poté následovalo odpojení vlákna z detektoru měřiče výkonu. Tento volný konec se ponořil do misky s kapalinou, která se nechala navzlínat do části vlákna, jak je detailně zobrazeno na obrázku 33. Celý aplikační proces včetně zalomení vlákna byl kontrolován mikroskopem. Po aplikaci analytického vzorku se zpět k detektoru optického měřiče výkonu připojil volný konec vlákna, aby se zaznamenala okamžitá hodnota detekovaného výkonu. Kapalina se následně nechala samovolně vytékat z naplněných dutin. Kontrola mikroskopem určovala přesnou vzdálenost plnění od konce vlákna. Současně s kontrolou polohy byla měřena a zaznamenávána i aktuální hodnota útlumu. Měření se opakovalo až do úplného vylití analyzovaného vzorku.



Obr. 33 Detailní schematické zobrazení navzlínané kapaliny v mikrostrukturním vlákne

5.6 Naměřené výsledky Suspended Core

Experimentální měření kapalin s vláknem Suspended Core, jehož čelní řez je zobrazen na obrázku 34, probíhalo na vlnových délkách 1310 a 1550nm. Jako analytické vzorky byly použity kapaliny etylalkohol (ETOH) a isopropylalkohol (IPA), jejichž index lomu je 1,360 pro etanol, respektive 1,378 pro isopropylalkohol. Oba vzorky jsou vhodné k ověření detekce a selektivity SC-PCF vláknem.



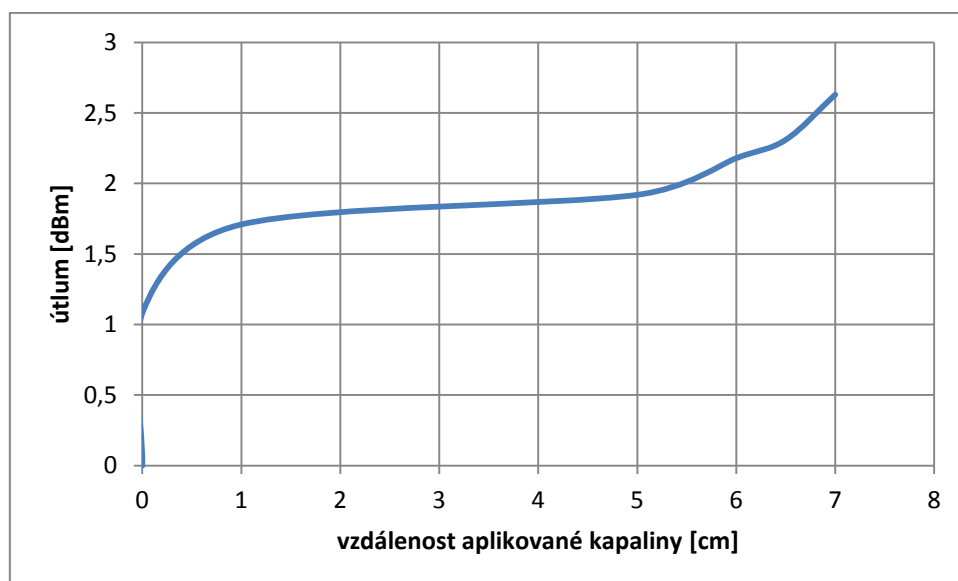
Obr. 34 Řez měřeným vláknem typu Suspended Core

Detekce isopropylalkoholu ve vlákně SC-PCF na vlnové délce 1310 nm probíhalo s výstupním výkonem laserového zdroje 2,5dBm. V tabulce 1 je uvedena závislost naměřených hodnot útlumu procházejícího signálu vláknem na délce plnění aplikované kapaliny v kapilárách.

SC-PCF IPA 1310nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0
0,01	1,1
1	1,71
5	1,92
6	2,18
6,5	2,31
7	2,63

Tab. 1 Výsledek měření isopropylalkoholu na 1310nm

Na obrázku 35 je uveden graf z tabulky 1. tj. závislost naměřených hodnot útlumu signálu na vzdálenosti aplikovaného analytického vzorku isopropylalkoholu.



Obr. 35 Graf – výsledek měření na 1310nm s vláknem SC-PCF a isopropylalkoholem

Experimentální detekce kapalin isopropylalkoholu a etylalkoholu na vlnové délce 1550nm probíhalo s výstupním výkonem laserového zdroje 16dBm, aby se dosáhlo dostatečné dynamiky měření. V tabulce 2 je uvedena závislost naměřených hodnot útlumu procházejícího signálu vláknem na vzdálenosti aplikovaného isopropylalkoholu a v tabulce 3 pro etylalkohol.

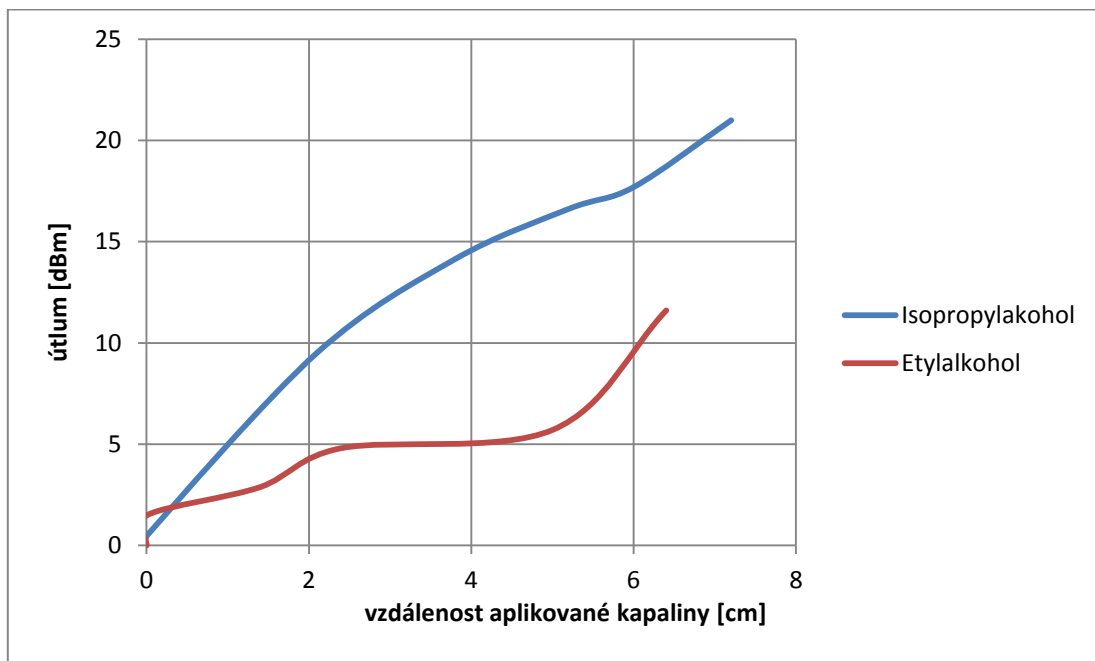
SCPCF IPA 1550nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0
0,01	0,5
2,1	9,51
3,8	14,14
5,2	15,62
6	16,7
7,2	21

Tab. 2 Výsledek měření isopropylalkoholu na 1550nm

SCPCF ETOH 1550nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0
0,01	1,5
1,4	2,88
2,4	4,8
5	5,7
6,4	11,6

Tab. 3 Výsledek měření etylalkoholu na 1550nm

Na obrázku 36 je uveden graf z tabulek 2 a 3, tj. závislost naměřených hodnot útlumu signálu na vzdálenosti aplikovaného analytu isopropylalkoholu a etylalkoholu. Z naměřených výsledků jsou patrné naměřené rozdílné útlumy jednotlivých kapalin na konkrétních délkách vlákna. Analyzované kapaliny lze od sebe tedy jednoznačně rozlišit. Výkyv průběhu trendu etylalkoholu, respektive rapidní nárůst útlumu mezi 5 a 6 cm je nejspíše způsoben poškozením čela vlákna, které vzniklo při aplikaci vzorku etylalkoholu do mikrostruktur vlákna.



Obr. 36 Graf – výsledek měření na 1550nm s vláknem SC-PCF

5.7 Naměřené výsledky Endlessly Single Mode

Experimentální měření kapalin s vláknem Endlessly Single Mode 12B, jehož čelní řez je zobrazen na obrázku 37, probíhalo tak jako Suspended Core na vlnových délkách 1310 a 1550nm. Byly použity stejné analytické vzorky, tj. etylalkohol a isopropylalkohol, jejichž index lomu je 1,360 pro etanol, respektive 1,378 pro isopropylalkohol, aby se ověřila detekce a selektivita ESM-12B vlákna.



Obr. 37 Řez měřeným vláknem typu Endlessly Single Mode 12B

Detekce isopropylalkoholu a etylalkoholu ve vlákne ESM-12B na vlnové délce 1310nm probíhalo s výstupním výkonem laserového zdroje 2,5dBm. V tabulce 4 je uvedena závislost naměřených hodnot útlumu procházejícího signálu vláknem na vzdálenosti aplikovaného isopropylalkoholu a v tabulce 5 pro etylalkohol.

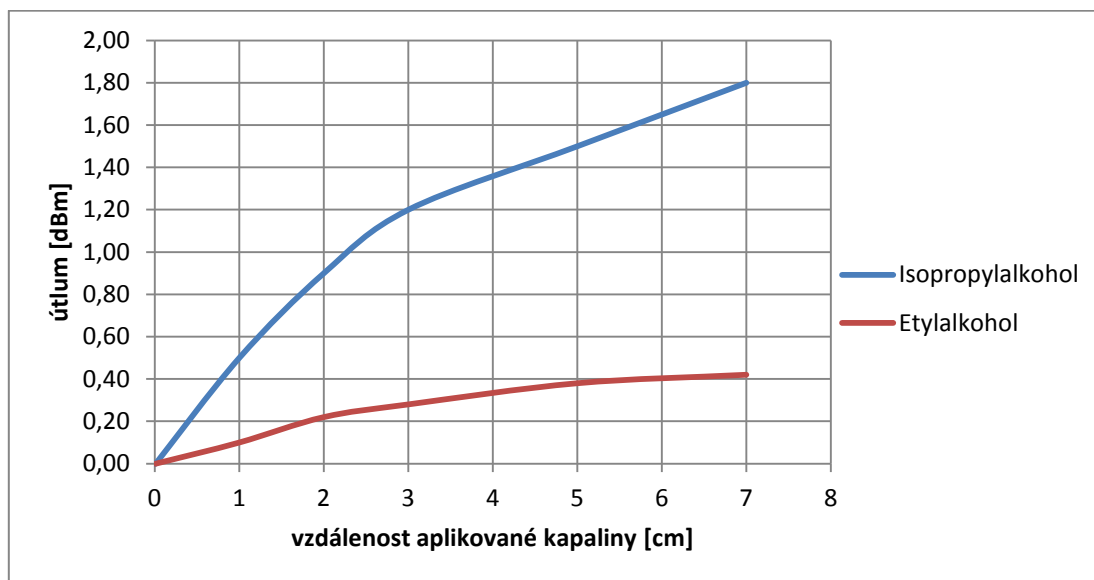
ESM-12B IPA 1310nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0
0,01	0
1	0,5
2	0,9
3	1,2
5	1,5
7	1,8

Tab. 4 Výsledek měření
isopropylalkoholu na 1310nm

ESM-12B ETOH 1310nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0
0,01	0
1	0,1
2	0,22
3	0,28
5	0,38
7	0,42

Tab. 5 Výsledek měření
etylalkoholu na 1310nm

Na obrázku 38 je uveden graf závislosti naměřených hodnot útlumu signálu na vzdálenosti aplikovaného analytu isopropylalkoholu a etylalkoholu. Z naměřených výsledků jsou patrné rozdílné útlumy jednotlivých kapalin, ovšem jejich difference nedosahují takových hodnot jako u vlákna Suspended Core. Na rozeznání těchto kapalin jsou kontrasty útlumu dostatečné.



Obr. 38 Graf – výsledek měření na 1310nm s vláknem ESM-12B

Experimentální měření s kapalinami isopropylalkohol a etylalkohol na vlnové délce 1550nm probíhalo se stejným výstupním výkonem zdroje, tj. 16dBm, aby bylo dosaženo dostatečné dynamiky měření. V tabulce 6 je uvedena závislost naměřených hodnot útlumu procházejícího signálu vláknem na vzdálenosti aplikovaného isopropylalkoholu a v tabulce 7 etylalkoholu.

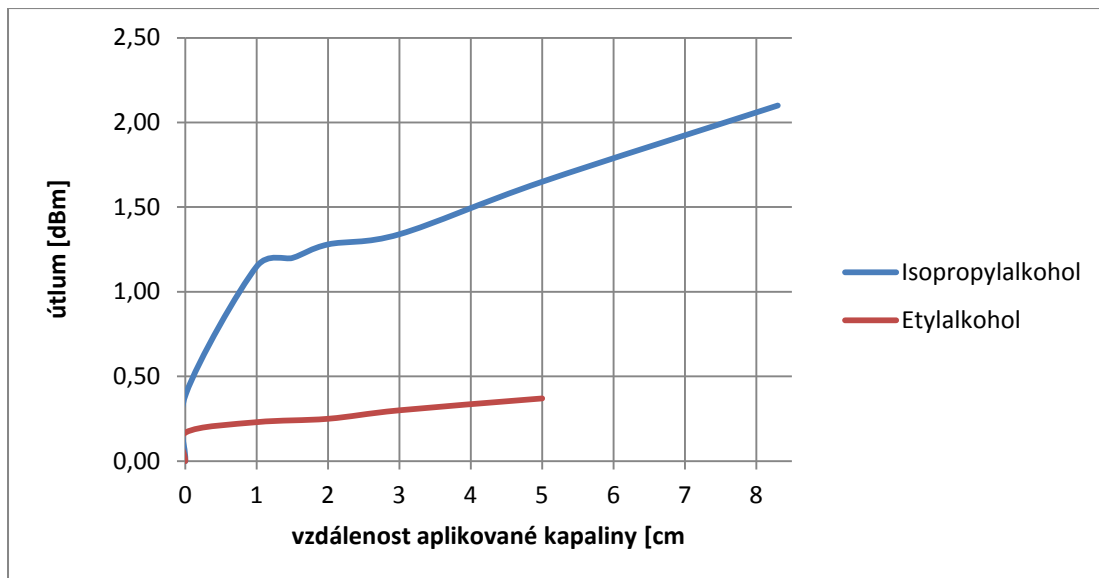
ESM IPA 1550nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0,00
0,01	0,40
1	1,15
1,5	1,20
2	1,28
3	1,34
5	1,65
8,3	2,10

Tab. 6 Výsledek měření isopropylalkoholu na 1550nm

ESM ETOH 1550nm	
délka [cm]	útlum [dB]
0	0,00
0,01	0,17
1	0,23
2	0,25
3	0,30
5	0,37

Tab. 7 Výsledek měření etylalkoholu na 1550nm

Na obrázku 39 je uveden graf závislosti naměřených hodnot útlumu signálu na vzdálenosti aplikovaného analytu isopropylalkoholu a etylalkoholu. Z naměřených výsledků jsou patrné naměřené rozdílné útlumy jednotlivých kapalin, které jsou podobné výsledkům z měření při použití laserového zdroje na vlnové délce 1310nm.



Obr. 39 Graf – výsledek měření na 1550nm s vláknem ESM-12B

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést experimentální měření mikrostrukturních optických vláken za účelem detekce kapalin o indexu lomu v rozmezí 1,33 až 1,43 v závislosti na vlnové délce a s využitím různých typů vláken. V teoretické části byly provedeny simulace, které na teoretické úrovni potvrdily možnost použití mikrostrukturních vláken za účelem detekce kapalin s uvedenými vlastnostmi.

Simulační výpočty byly prováděny v programu BeamProp na modelech optických vláken typu Suspended Core a Photonic Crystal Fiber na vlnových délkách 850, 1310, 1550 a 1610nm. Simulací bylo ověřeno, že délka vlákna okolo cca 6cm je dostačující k rozlišení rozdílných vlastností vláken s kapalinami, které jsou aplikované do mikrostrukturních kapilárních dutin. Z výsledků provedených simulací vychází, jako nejvhodnější pracovní vlnová délka pro oba typy vláken na 1550nm.

V závislosti na výsledcích simulace bylo stanoveno, že experimentální měření bude probíhat na dvou vlnových délkách a to na 1550nm a 1310nm. Tedy na vlnové délce, která je z hlediska měření výhodná (1550nm.) a na vlnové délce 1310nm, která byla zvolena z důvodu ověření přesnosti, citlivosti měření a potvrzení výsledků počítačové simulace.

Pro experimentální část diplomové práce byla zvolena metoda navázání signálu pomocí fokusační optiky. Jako detekční úseky byla zvolena vlákna Suspended Core a Endlessly Single Mode 12B. Analyzovanými kapalinami byly etylalkohol a isopropylalkohol. Experimentálním měřením na vlnových délkách 1310nm a 1550nm byly ověřeny teoretické předpoklady, které byly výsledkem simulačních analýz. Z výsledků jednoznačně vyplývá rozdíl útlumů při použití kapalin s rozdílným indexem lomu. Vláknem typu Suspended Core reagovalo při aplikaci kapaliny do stejné vzdálenosti větším útlumem než vlákno Endlessly Single Mode 12B. Tento výsledek je dobře patrný na grafickém znázornění na obrázku 35. I když výsledky analýz provedených u obou vláken dokáží rozeznat rozdíly vlastností obou detekovaných látek, Suspended Core vlákno reagovalo na přítomnost analytu změnou útlumu signálu mnohem markantněji, než vlákno typu Endlessly Single Mode 12B. Rozdíl útlumů mezi etylalkoholem a isopropylalkoholem na vlnové délce 1550nm u vlákna Suspended Core a vzdálenosti 5cm je

necelých 10dB, na rozdíl od Endlessly Single Mode 12B, kde je tento rozdíl jen 1,28dB. Při uvedené analýze hraje významnou roli délka, do jaké je detekovaná látka aplikována. Stanovení této vzdálenosti spolu s indexem lomu látky a vlnovou délkou optického paprsku určuje hranice pro použitelné provádění detekce kapalin.

Z provedených experimentálních měření vyplývá, že refraktometrická metoda je pro detekci kapalných látek v rozsahu indexu lomu 1,33 – 1,43 použitelná. Pro její rozsáhlé praktické použití by bylo zapotřebí zjednodušení technologického postupu měření, a to zejména navázání světelného signálu do vlákna, aby měření probíhalo časově přijatelnou dobu. Tento problém by mohl řešit mikropočítač s vhodnými polohovatelnými aktuátory, jako jsou například vzduchové membrány nebo krokové elektromotory. Další vývoj by se měl také věnovat miniaturizaci, protože experimentální sestava není z důvodu rozsáhlého měřicího aparátu mobilní. Je zapotřebí zdokonalit způsob aplikace kapalin do mikrostruktur vláken. V neposlední řadě zůstává otázka, zda je výhodnější využívat pro detekci kapalin již vyráběná mikrostrukturní optická vlákna, nebo pro tento účel vyvinout a vyrobit vlákno speciální.

Nespornou výhodou tohoto způsobu detekce je velmi malé, až zanedbatelné množství kapalin nutné k detekci. Pro vlákno Suspended Core stačí 212nl kapaliny pro naplnění do vzdálenosti 10cm. Pro vlákno Endlessly Single Mode-12B je zapotřebí z důvodu jeho 126 mikrostrukturních dutin větší množství kapaliny, než v předchozím případě a to 40 μ l. I toto množství lze považovat za zanedbatelné.

Seznam literatury

- [1] P. Kaiser, E. A. J. Marcatili, S. E. Miller.: *A new optical fiber* Bell Syst. Tech. 1973
- [2] P. Russell, *Photonic Crystal fibers : A historical account*, IEEE LEOS Newstler 10/2007
- [3] P. Tvarožek, *Štúdium nelineárnych javov v mikroštruktúrnych vláknach*, Diplomová práca, Žilinská univerzita v Žilíně, 2008
- [4] P. Toupin, L. Brilland, G. Renversez, J. Troles, *All-solid all-chalcogenide microstructured optical fibers*, Optics Express No.12, str. 14643-14648, 2013
- [5] NK photonics , *Crystal Fibre TECHNOLOGY TUTORIAL* ,[cit.20.4.2015], [online] Dostupné z <http://www.nktphotonics.com/side5302.html>
- [6] P. J. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. J. Mangan, D. P. Williams, L. Farr, M. W. Mason and A. Tomlinson, *Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers*, OPTICS EXPRESS Vol. 13, str. 236-244, 2005
- [7] L.Boháč, M. Lucki *Optické komunikační systémy*, ČVUT, 2010
- [8] M. Dočkal , *Fotonická krystalická vlákna*, Diplomová práca, Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [9] P. Novák, *Teoretické vyšetřovanie vlastností vlákien z fotonických kryštálov (PCFs)*, Diplomová práca, Žilinská univerzita v Žilíně 2006
- [10] *Hollow Core Photonic Bandgap Fiber*, NK photonics, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z <http://www.nktphotonics.com/files/files/HC19-1550.pdf>
- [11] *Photonic Crystal Fibers*, RP photonics encyklopedia ,[cit.20.4.2015], [online] Dostupné z http://www.rp-photonics.com/photonic_crystal_fibers.html
- [12] J. Joannopolous, S. Johnson, J. Winn, R. Meade, *Photonic crystal Molding the Flow of light* – Second Edition, Princeton University Press, 2007
- [13] N. Sharma, N Rajawat, K. Agrawal, *Photonic Crystal Fiber Characteristics Benefits Numerous Applications*, International Journal of Scientific and Engeneering Research Vol. 6 str. 28-33, 2015
- [14] T. Monro, W. Belardi, K. Furusawa, J. C. Baggett, R. Broderic, *Sensing with microstructured optical fibers*, Mean. Sci. Tech. Vol. 12 No. 7 2001
- [15] L. Fu, B. K. Thomas, L. Dong, *Efficient supercontinuum generations in silica suspended core fibers*, OPTICS EXPRESS, Vol. 16, str. 19629-19642 2008
- [16] I. Savelli, O. Mouawad, J. Fatome, *Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured Sulfide and Tellurite optical fibers*, OPTICS EXPRESS, Vol. 20, str. 27083-27093, 2012

- [17] M. Lucki, *Mikrostrukturální optická vlákna a speciální optická vlákna s kvantovou strukturou*, 2010, ČVUT
- [18] Hollow Core Photonic Crystal Fibers, ThorLabs, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?objectgroup_id=912
- [19] Hollow Core Fibers , RP photonics encyklopedia, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z http://www.rp-photonics.com/hollow_core_fibers.html
- [20] Hollow-Core, Photonic Crystal Fibers, ThorLabs, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1046.PDF>
- [21] M. Skorobogatiy, *Microstructured and Photonic Bandgap Fibers for Applications in the Resonant Bio- and Chemical Sensors*, Journal of Sensors, Volume 2009, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/524237/>
- [22] Fiber Optic Sensors, Universita Publica de Navarra, [cit.20.4.2015], [online] Dostupné z <http://www.unavarra.es/optical-communications-group/research-lines/fiber-optic-sensors>
- [23] F. Poli, D. Passaro, A. Cucinotta, S. Selleri, *Sensing through suspended solid core photonic crystal fiber*, The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Jun 2009
- [24] S. Olyae, A. Naraghi, *Design and optimization of index guiding photonic crystal fiber gas sensor* Photonic Sensors Vol. 3, str. 131-136, 2013
- [25] W. Quian, Z. Chun-Liu, K. Ni, J. Kang, X. Dong, Shangzhong Jin, *A high sensitivity refractometer based on a partial liquid filled hollow core photonic bandgap fiber*, Electronics and Optoelectronics, str. V4-68 - V4-71 29-31 July, 2011
- [26] J.Villatoro, V.Finazzi, V.Pruneri, *Functional Photonic Crystal Fiber Sensing Devices*, Passive Components and Fiber-Based Devices VIII, str. 1-6, 13-16. Nov 2011
- [27] H.Frosz, A. Stefani, O. Bang, *Highly sensitive and simple method for refractive index sensing of liquids in microstructured optical fibers using four-wave mixing*, Optics Express Vol. 19, str. 10471-10484, 2011

Seznam obrázků

- Obr. 1 Struktura mikrostrukturního vlákna v řezu
- Obr. 2 Grafické zobrazení hodnoty útlumu HC19 vlákna v závislosti na délce [10]
- Obr. 3 Postup výroby mikrostrukturních optických vláken a tažení [5]
- Obr. 4 Rozdělení mikrostrukturních optických vláken
- Obr. 5 PCF vlákno v řezu [11]
- Obr. 6 SCPCF vlákno v řezu [15]
- Obr. 7 HCPCF vlákno v řezu [10]
- Obr. 8 BF vlákno v řezu
- Obr. 9 Optický senzor polohy [22]
- Obr. 10 Simulační model Suspended Core
- Obr. 11 Výsledek simulace Display material profile
- Obr. 12 Profil stopy pole modelem Suspended Core
- Obr. 13 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 850nm
- Obr. 14 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1310nm
- Obr. 15 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1550nm
- Obr. 16 Závislost útlumu SC-PCF plněného kapalinou na vlnové délce 1610nm
- Obr. 17 Simulační model Endlessly Single Mode 12B
- Obr. 18 Výsledek simulace Display material profile
- Obr. 19 Profil stopy pole Endlessly Single Mode 12B
- Obr. 20 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 850nm
- Obr. 21 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1310nm
- Obr. 22 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1550nm
- Obr. 23 Závislost útlumu ESM- 12B plněného kapalinou na vlnové délce 1610nm
- Obr. 24 Schéma zapojení přenosu signálu ve volném prostoru
- Obr. 25 Schéma zapojení přímého spojení PCF a SMF
- Obr. 26 Experimentální měřicí sestava
- Obr. 27 Schéma zapojení měřicí soustavy
- Obr. 28 Laserový zdroj CoBrite DX 4
- Obr. 29 Optický měřič výkonu PM 100D
- Obr. 30 Detail navazování signálu do SMF vlákna
- Obr. 31 Měřicí sestava s mikroskopem
- Obr. 32 Navzlínaný isopropylalkohol v SC-PCF vláknu
- Obr. 33 Detailní schematické zobrazení navzlínané kapaliny v mikrostrukturním vlákně
- Obr. 34 Řez měřeným vláknem typu Suspended Core
- Obr. 35 Graf – výsledek měření na 1310nm s vláknem SC-PCF a isopropylalkoholem
- Obr. 36 Graf – výsledek měření na 1550nm s vláknem SC-PCF
- Obr. 37 Řez měřeným vláknem typu Endlessly Single Mode-12B
- Obr. 38 Graf – výsledek měření na 1310nm s vláknem ESM-12B
- Obr. 39 Graf – výsledek měření na 1550nm s vláknem ESM-12B

Příloha

850nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,35	0,45	0,56	0,64	0,82	1,41
2	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,54	0,58	0,72	0,92	1,94
3	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,54	0,72	0,74	0,82	1,11	2,38
4	0,45	0,54	0,54	0,54	0,54	0,65	0,72	0,82	1,02	1,41	2,73
5	0,45	0,54	0,54	0,72	0,82	0,82	0,92	1,01	1,11	1,62	3,10
6	0,54	0,63	0,63	0,72	0,82	0,92	0,92	1,11	1,41	1,94	3,48
7	0,54	0,63	0,63	0,72	0,82	0,92	1,01	1,41	1,62	2,16	3,74
8	0,54	0,63	0,63	0,82	0,82	1,01	1,01	1,72	2,05	2,56	4,01
9	0,54	0,63	0,72	0,82	0,92	1,01	1,11	2,16	2,62	2,97	4,44
10	0,54	0,63	0,72	0,82	0,92	1,01	1,11	2,50	2,97	3,48	5,19

Tab. 8 Výsledky simulace Suspended Core vlákna na 850nm

1310nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,26	0,28	2,05	4,44	6,02
2	0,18	0,18	0,26	0,26	0,26	0,26	0,35	0,43	2,16	4,44	13,98
3	0,35	0,35	0,35	0,35	0,45	0,45	0,47	0,56	2,20	6,02	60,00
4	0,35	0,35	0,35	0,45	0,54	0,63	0,67	0,71	2,38	6,94	60,00
5	0,35	0,35	0,39	0,45	0,63	0,72	0,77	0,81	2,44	7,54	60,00
6	0,45	0,45	0,54	0,54	0,63	0,72	0,82	0,92	2,50	7,54	60,00
7	0,45	0,45	0,54	0,54	0,72	0,82	0,92	1,06	2,85	7,96	60,00
8	0,45	0,45	0,63	0,63	0,72	0,86	1,01	1,25	3,10	8,40	60,00
9	0,45	0,54	0,63	0,72	0,82	1,01	1,21	1,41	3,35	9,12	60,00
10	0,45	0,54	0,63	0,72	0,92	1,11	1,31	1,72	3,74	11,06	60,00

Tab. 9 Výsledky simulace Suspended Core vlákna na 1310nm

1550nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,72	0,82	1,94	1,94	6,02	20,00
2	0,27	0,31	0,45	0,47	0,54	0,82	0,92	2,50	4,44	8,40	60,00
3	0,27	0,31	0,47	0,51	0,58	0,92	1,21	2,73	5,19	11,37	60,00
4	0,34	0,35	0,46	0,60	0,71	0,92	1,62	3,10	5,85	20,00	60,00
5	0,36	0,43	0,46	0,66	0,82	1,11	2,05	3,35	6,38	60,00	60,00
6	0,42	0,45	0,60	0,72	1,11	1,41	2,50	3,74	6,94	60,00	60,00
7	0,45	0,51	0,64	0,92	1,51	1,94	2,85	4,01	7,74	60,00	60,00
8	0,58	0,69	0,77	1,31	1,94	2,50	3,22	4,44	9,12	60,00	60,00
9	0,63	0,68	0,88	1,72	2,16	2,85	4,01	4,73	10,46	60,00	60,00
10	0,72	0,72	0,92	1,94	2,73	3,74	4,73	5,68	12,04	60,00	60,00

Tab. 10 Výsledky simulace Suspended Core vlákna na 1550nm

1610nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,18	0,26	0,26	0,35	0,35	0,40	0,54	1,01	3,74	6,02	20,00
2	0,26	0,33	0,45	0,45	0,54	0,71	0,81	2,27	5,19	7,96	60,00
3	0,32	0,42	0,45	0,58	0,72	1,16	1,28	2,85	7,74	12,04	60,00
4	0,41	0,51	0,54	0,61	0,82	1,31	1,51	3,35	8,40	15,92	60,00
5	0,43	0,63	0,70	0,72	1,02	1,72	1,94	3,88	9,90	60,00	60,00
6	0,59	0,70	0,77	1,01	1,41	2,16	2,62	4,44	10,46	60,00	60,00
7	0,70	0,77	0,82	1,19	1,72	2,50	3,22	4,73	11,06	60,00	60,00
8	0,72	0,82	0,89	1,35	1,94	2,85	4,15	5,35	13,15	60,00	60,00
9	0,77	0,88	0,92	1,72	2,27	3,22	4,73	6,02	14,89	60,00	60,00
10	0,82	0,92	1,01	1,98	2,85	3,74	5,51	6,38	17,72	60,00	60,00

Tab. 11 Výsledky simulace Suspended Core vlákna na 1610nm

850nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomů [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,21	1,21	1,22	1,41	1,41	1,41	1,51	1,51	1,51	1,51	2,73
2	1,41	1,45	1,49	1,62	1,62	1,83	1,94	1,94	1,94	1,94	3,10
3	1,44	1,46	1,62	1,62	1,62	1,83	1,94	1,94	1,94	2,14	3,31
4	1,45	1,49	1,62	1,62	1,72	1,83	1,94	1,94	1,94	2,24	3,62
5	1,48	1,51	1,62	1,62	1,72	1,83	1,94	1,94	2,00	2,37	3,72
6	1,50	1,62	1,62	1,72	1,83	1,94	1,95	1,96	2,06	2,43	3,77
7	1,51	1,62	1,72	1,72	1,83	1,94	2,05	2,04	2,12	2,51	3,80
8	1,51	1,62	1,72	1,72	1,94	1,94	2,06	2,07	2,27	2,72	3,86
9	1,51	1,62	1,72	1,83	1,94	1,94	2,14	2,21	2,36	2,91	3,94
10	1,51	1,62	1,72	1,94	1,96	2,05	2,16	2,25	2,50	3,10	4,01

Tab. 12 Výsledky simulace Endlessly Single Mode 12B vlákna na 850nm

1310nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomů [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,92	0,92	1,41	1,41	1,72	1,94	1,94	2,16	2,27	3,22	12,04
2	1,11	1,22	1,51	1,62	1,94	2,00	2,16	2,38	2,76	4,01	13,56
3	1,41	1,45	1,57	1,83	2,05	2,06	2,50	2,66	3,10	4,44	14,89
4	1,49	1,57	1,72	1,94	2,16	2,23	2,82	2,91	3,88	5,35	17,72
5	1,72	1,96	2,16	2,27	2,50	2,50	3,06	3,10	4,29	7,33	20,00
6	2,05	2,23	2,28	2,38	2,62	2,73	3,24	3,45	4,93	8,54	21,94
7	2,50	2,64	2,73	2,85	2,88	2,97	3,48	4,01	5,26	10,12	23,67
8	2,62	2,67	2,85	2,91	2,95	3,22	3,74	4,44	6,20	10,46	27,13
9	2,67	2,73	2,91	2,97	3,10	3,35	4,29	4,73	7,54	11,78	31,12
10	2,73	2,79	2,99	3,24	3,35	3,74	4,58	5,10	9,12	16,48	40,00

Tab. 13 Výsledky simulace Endlessly Single Mode 12B vlákna na 1310nm

1550nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,72	0,82	0,92	1,01	1,01	1,51	1,72	2,50	2,85	3,10	6,94
2	0,92	0,92	1,11	1,17	1,24	1,72	2,05	2,85	3,24	3,48	8,40
3	0,92	1,06	1,21	1,36	1,49	1,81	2,38	3,04	3,35	3,76	9,12
4	1,11	1,21	1,41	1,51	1,61	1,99	2,66	3,29	3,52	4,15	10,12
5	1,25	1,41	1,62	1,72	1,94	2,10	2,85	3,43	3,74	4,73	11,20
6	1,41	1,51	1,83	1,94	2,05	2,38	3,17	3,74	4,01	5,19	11,90
7	1,62	1,72	2,06	2,16	2,27	2,60	3,25	3,81	4,15	6,20	13,56
8	1,83	1,94	2,27	2,34	2,50	2,85	3,32	3,82	4,29	6,94	14,89
9	1,99	2,16	2,43	2,62	2,73	3,12	3,48	3,92	4,73	7,54	16,48
10	2,16	2,38	2,62	2,73	2,97	3,22	3,74	4,15	5,04	8,18	17,39

Tab. 14 Výsledky simulace Endlessly Single Mode 12B vlákna na 1550nm

1610nm	Útlum										
Délka [cm] / Ind. lomu [-]	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,05	2,06	2,27	2,50	2,50	2,73	3,10	3,22	3,35	3,74	10,75
2	2,10	2,10	2,33	2,59	2,73	2,91	3,22	3,48	4,01	4,44	12,04
3	2,15	2,20	2,48	2,85	3,04	3,10	3,32	3,61	4,44	5,19	15,92
4	2,26	2,32	2,50	3,03	3,14	3,16	3,41	3,65	4,73	6,02	13,98
5	2,36	2,41	2,55	3,12	3,16	3,35	3,72	3,86	5,35	7,41	20,00
6	2,33	2,46	2,62	3,34	3,43	3,61	4,01	4,12	5,85	8,28	40,00
7	2,33	2,59	2,65	3,41	3,73	4,01	4,44	4,63	6,38	10,17	40,00
8	2,56	2,69	2,81	3,45	3,80	4,08	4,91	5,13	6,94	12,04	40,00
9	2,73	2,84	3,11	3,50	3,84	4,24	5,19	5,85	7,96	14,89	40,00
10	2,79	3,02	3,22	3,54	3,88	4,44	5,51	6,20	9,12	18,42	40,00

Tab. 15 Výsledky simulace Endlessly Single Mode 12B vlákna na 1610nm