



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

VLÁKNOVĚ OPTICKÉ SENZORY PRO BIOMEDICÍNU: EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE PLASTOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN

FIBER-OPTIC SENSORS FOR BIOMEDICINE: EXPERIMENTAL STUDY OF PLASTIC OPTICAL
FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ NÁCOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Tomáš Nácovský

ID: 133975

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Vláknově optické senzory pro biomedicínu: experimentální studie plastových optických vláken

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se s problematikou vláknových senzorů. 2) Sestavte experimentální pracoviště a proveďte charakterizaci optických vlastností vybraných optických vláken. 3) Navrhněte metody měření změny koncentrace modelové látky v kapalném prostředí. 4) Sestavte experimentální pracoviště pro vybrané metody měření. 5) Proveďte sadu měření změny koncentrace modelové látky u jednotlivých metod a jednotlivých vláken. 6) Proveďte diskuzi dosažených výsledků. 7) Na základě poznatků navrhněte jednoduchý kompaktní systém pro měření změny koncentrace modelové látky v kapalném prostředí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, B., E., TEICH, M., C.: Fundamentals of photonics. New York: Wiley, 2007. ISBN 978-0471839651.

[2] POSPIŠILOVÁ, M., KAŠÍK, I., MATĚJEC, V.: Vláknová optika pro biologii a medicínu, skripta ČVUT, Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04807-8.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této práce je experimentální studium mikrostrukturálních polymerových optických vláken (mPOF) a jejich možné aplikace jako základního stavebního kamenu pro optické vláknové senzory jako i experimentální sestavení těchto senzorů.

Klíčová slova

POF, mPOF, polymerová optická vlákna, optické vláknové senzory, Braggova mřížka

Abstract

The thesis deals with experimental study of microstructured polymer optical fibres (mPOF) and more specifically with mPOF (microstructured Polymer Optical Fibres) and their possible application in optical fiber sensors as well as experimental assembling of these sensors.

Key words

POF, mPOF, polymer optical fibres, optical fiber sensors, fiber Bragg grating

NÁCOVSKÝ, T. *Vláknově optické senzory pro biomedicínu: experimentální studie plastových optických vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44s, 5s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Sedlák, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma **Vláknově optické senzory pro biomedicínu: experimentální studie plastových optických vláken** jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Poděkování

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Sedlákovi, Ph.D za jeho velkou pedagogickou pomoc, ochotu a vstřícnost při měření i za věcné připomínky připsané této bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	1
1 ÚVOD DO VLÁKNOVÉ OPTIKY	2
1.1 SVĚTELNÝ PAPERSEK A ZÁKLADNÍ VZTAHY GEOMETRICKÉ OPTIKY	2
1.2 PRINCIP ŠÍŘENÍ SVĚTLA OPTICKÝM VLÁKNEM.....	4
1.3 DRUHY VLÁKEN.....	5
1.3.1 Základní druhy optických vláken podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny:	5
1.3.2 Rozdělení podle použití:	6
1.3.3 Rozdělení vláken podle vidů:.....	6
1.4 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN	6
1.4.1 Rozměry.....	6
1.4.2 Index lomu jádra a obalu	6
1.4.3 Normalizovaná frekvence a počet vedených vidů	6
1.4.4 Intervisívní disperze	7
1.4.5 Útlum.....	8
1.4.6 Numerická apertura ‚NA‘	10
1.5 SPECIÁLNÍ OPTICKÁ VLÁKNA	11
1.5.1 Mikrostrukturální a fotonická optická vlákna	11
1.5.2 Vlákná s dutým jádrem.....	11
2 OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY	12
2.1 ROZDĚLENÍ OPTOVLÁKNOVÝCH SENZORŮ	13
2.2 SENZORY BRAGGOVOU VLÁKNOVOU MŘÍŽKOU ‚FBG‘	13
2.3 DISTRIBUOVANÉ SNÍMÁNÍ.....	15
2.4 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ BIOSENZORY	15
2.4.1 Využívané látky.....	15
2.5 ABSORPČNÍ OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY	16
2.6 PATENTOVANÁ ŘEŠENÍ SENZORŮ	17
3 MĚŘENÍ A VLASTNOSTI VLÁKEN	19
3.1 TABULKA VLASTNOSTÍ UDÁVANÝCH VÝROBCEM:	19
3.2 VLASTNOSTI NAMĚŘENÉ V LABORATOŘI	19
3.2.1 Numerická apertura	21
3.2.2 Průřez vlákna a putování světla vláknem.....	22
4 REALIZACE VLÁKNOVÉHO SENZORU	24
4.1 METODY VYUŽÍVAJÍCÍ SAMOVOLNÉHO VYVAZOVÁNÍ SVĚTLA Z VLÁKNA	24

4.1.1	<i>Senzorika za použití celistvého vlákna bez ohybu</i>	24
4.1.2	<i>Senzorika za použití celistvého vlákna s fixním poloměrem ohybu</i>	25
4.1.3	<i>Senzorika za použití celistvého vlákna s proměnlivým poloměrem ohybu</i>	27
4.2	METODY VYUŽÍVAJÍCÍ ZMĚNU INDEXU LOMU PLÁŠTĚ VLÁKNA JEHO UBROUŠENÍM	28
4.2.1	<i>Senzorika za použití zabroušeného vlákna bez ohybu</i>	28
4.2.2	<i>Senzorika za použití zabroušeného vlákna s ohybem</i>	28
4.3	METODY VYUŽÍVAJÍCÍ ZMĚNU INDEXU LOMU PLÁŠTĚ VLÁKNA JEHO ODLEPTÁNÍM	30
4.3.1	<i>Senzorika za pomoci leptaného vlákna bez ohybu</i>	31
5	ZÁVĚR	34
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
6	PŘÍLOHY	37

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Lineárně polarizované elektromagnetické vlnění – světlo [4].....	2
Obrázek 2:	Ilustrace chování světla procházejícího dvěma prostředími s rozdílným n pod určitým úhlem ($n_2 < n_1$).....	3
Obrázek 3:	Optická vlákna dle vidů [12]	8
Obrázek 4:	Ztráty způsobené makroohyby	9
Obrázek 5:	Ztráty způsobené mikroohyby	9
Obrázek 6:	Schéma numerické apertury [12].....	10
Obrázek 7:	Optické vlákno s braggovou mřížkou [13]	13
Obrázek 8:	Příklady mřížek ve FBG [12]	14
Obrázek 9:	Využití mikroohybů pro měření teploty [13]	15
Obrázek 10:	Možné schéma průtokové verze senzoru	17
Obrázek 11:	Zavedení absorpčního senzoru do řečiště	17
Obrázek 12:	Detail absorpčního senzoru	18
Obrázek 13:	Optické pracoviště	20
Obrázek 14:	Model univerzálního držícího přípravku pro optická vlákna	20
Obrázek 15:	Detail vlastního měření NA (detektor vlevo, držák vpravo)	21
Obrázek 16:	Napětí na detektoru v závislosti na natočení vlákna.....	22
Obrázek 17:	Průřez vláknem SM-340	23
Obrázek 18:	Použitý způsob zkoumání průřezu vláken	23
Obrázek 19:	Smyčky vlákna G3-340 uložené v nádobě	25
Obrázek 20:	Citlivost vlákna FM-340 na ohyb	27
Obrázek 21:	Schéma ohybu ubroušeného vlákna	29
Obrázek 22:	Snímací část senzoru s vláknem FM-340	32
Obrázek 23:	Průběh změn intenzity po ponoření	32

Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklad enzymatických biosenzorů v lékařství [13].	16
Tabulka 2: Vlastnosti vláken	19
Tabulka 3: Naměřená NA pro všechna použitá vlákna	21
Tabulka 4: Výsledek experimentu vlákna FM-340 s pevným průměrem 3,5cm	26
Tabulka 5: Citlivost vodivosti vlákna FM-340 na změny poloměru a prostředí	27
Tabulka 6: Měřené změny intenzit světla v ohnutém vlákne	29

ÚVOD

Vláknově optické senzory mají své nezastupitelné místo v širokém rozsahu aplikací v oblastech jako medicína, chemie, silnoproudá elektrotechnika, letecký a automobilový průmysl nebo v prostředích výbušných či se silným elektromagnetickým rušením. Tyto senzory monitorují změnu koncentrací chemických látek či změnu velikosti fyzikálních veličin s cílem zajistit bezpečný chod lidského života, tj. vyhlášení včasného varování před nebezpečnou situací, a dále monitorování vlivů působících na zkoumaný objekt či živý organismus, [13].

Tyto optické senzory představují zařízení pro kontinuální sledování fyzikálních nebo (bio)chemických parametrů okolí pomocí optického elementu (vlákna), které se skládají ze zdroje záření, optického elementu (vlákna, vlnovodu) a detektoru [13].

Optická vlákna jsou nedílnou součástí současných telekomunikačních systémů pro přenos dat a v posledních dekádách se tedy stále více uplatňují zejména v zobrazovací, detekční a diagnostické technice. Tento obrovský rozsah využití různých druhů vláken vyplývá z vývoje laserových systémů, velmi citlivých detektorů a speciálních typů optických vláken.

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi a využití mikrostrukturálních polymerových optických vláken (mPOF) jako základních stavebních prvků pro vláknově optické senzory. Postupně je zde uvedeno základní seznámení s rozdělením a parametry optických vláken a dále základními principy vláknově optických senzorů pro aplikace v biomedicině.

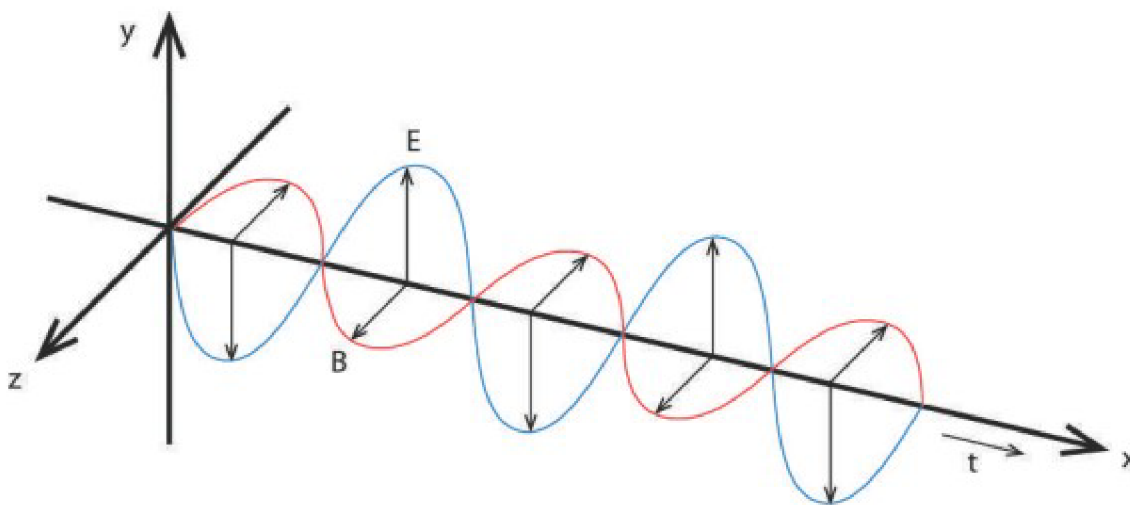
V experimentální části se pak zabývám jednak sestavením aparatury pro měření numerické apertury, napojení laserového paprsku do vlákna a z vlákna na detektor, vlastním měřením a analýzy vhodného seřiznutí vlákna. V závěru představuji možné řešení mého vlastního optického vláknového senzoru se třemi typy mPOF.

V následujících kapitolách je zevrubně popsán postup experimentů využívajících různých vlastností vláken pro sensoriku. Postupně směřující k funkčnímu modelu vláknově optického senzoru, jehož plášť je zcela po odleptání nahrazen tekutinou o jiném indexu lomu.

1 ÚVOD DO VLÁKNOVÉ OPTIKY

1.1 Světelný paprsek a základní vztahy geometrické optiky

Světlo je elektromagnetické vlnění, jehož viditelná část (lidským okem) je v rozmezí vlnových délek 350-750 nm. S pojmem „světelný paprsek“ se můžeme setkat i v případě elektromagnetického vlnění v infračervené oblasti. Světlo má duální charakter, tj. má vlastnosti vlnění i částice, přičemž tyto částice se nazývají fotony. Jakožto vlnění může být popsáno fyzikálními veličinami vlnová délka (proměnná s prostředím), frekvence (závisí na zdroji elektromagnetického záření) a rychlosti šířením (proměnné s prostředím). Šíření elektromagnetického vlnění je ilustrováno na Obrázek 1. Vlna je tvořena dvěma navzájem kolnými složkami, modře znázorněná složka odpovídá elektrické intenzitě E a červeně znázorněná složka odpovídá magnetické indukci B elektromagnetického vlnění šířícího se prostorem v určitý čas t [3]. Takové to znázornění označujeme pojmem „lineárně polarizovaný světelný paprsek“.



Obrázek 1: Lineárně polarizované elektromagnetické vlnění – světlo [4].

Šíření světelné vlny v daném prostředí lze zjednodušeně charakterizovat **indexem lomu**, který je poměrem mezi rychlostí šíření ve vakuu a rychlostí šíření v daném prostředí, viz následující vztah (1):

$$v = \frac{c}{n}, \quad (2)$$

kde v značí rychlost v daném prostředí, c rychlost šíření světla ve vakuu a n je index lomu. Tato veličina charakterizující dané prostředí je komplexní veličina závislá na frekvenci

zdroje záření, nicméně pro většinu látek pokládáme tuto veličinu za konstantní a vždy větší nebo rovnu 1.

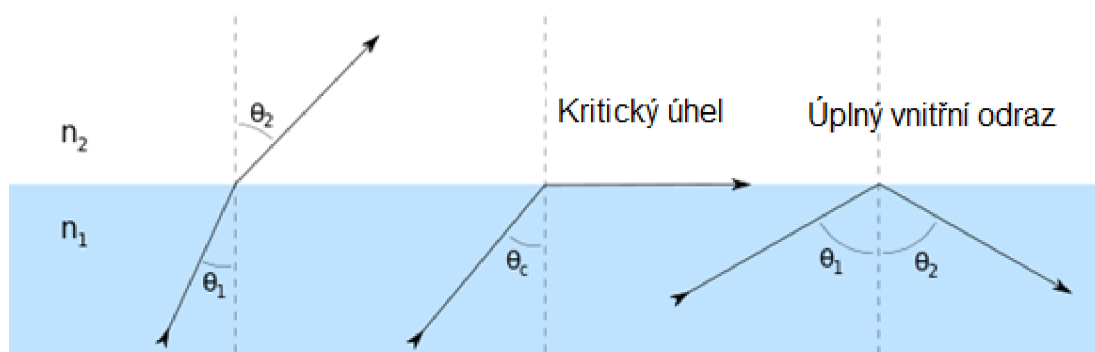
Pro dvě prostředí pak můžeme mluvit o prostředí opticky hustším či řidším v závislosti na velikosti jejich indexů lomu. V prostředích optickou hustotou bližších vakuu cestuje světlo rychleji a vice versa.

Základní postuláty geometrické optiky vycházejí z Fermatova principu: „světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby doba potřebná k proběhnutí této dráhy nabývala extrémní hodnotu“. Tedy předpokládáme přímočaré šíření paprsků v homogenním prostředí a odraz a lom na rozhraní dvou prostředí, tj. **Snellova zákona** (3)[3], který je popsán vztahem

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

kde θ_1 je úhel dopadu, θ_2 úhel lomu, v_1 a v_2 pak rychlostmi šíření v daných prostředích.

Tento zákon popisuje průchod světla na rozhraní mezi dvěma prostředími, kdy mohou nastat čtyři možnosti, jak se světlo zachová. V případě že obě prostředí mají stejný index lomu, paprsek projde nelomen. Pokud jsou indexy rozdílné a světlo neprochází jako kolmice na rozhraní prostředí, s úhlem menším, než kritický úhel poté bude paprsek lomen, avšak stále bude procházet viz. Obrázek 2. Pokud však dojde k tomu, že je dosaženo kritického úhlu, bude světlo cestovat na hranici rozhraní. Čtvrtou možností je totální odraz, reflexe. Záleží ovšem i na směru putování světla tzn., pokud bude světlo putovat z hustšího prostředí do řidšího či naopak potom se uplatňuje lom od a ke kolmici. Tohoto efektu využívá například refraktometr.



Obrázek 2: Ilustrace chování světla procházejícího dvěma prostředími s rozdílným n pod určitým úhlem ($n_2 < n_1$)

Pokud opustíme svázanou paprskovou optiku a přiblížíme se reálnému šíření světla, musíme při průchodu rozhraními uvažovat, že část světla projde a část světla se odrazí, mluvíme tedy o odrazu, ne však o úplném odrazu.

1.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Počátek historie optických vláken lze datovat do první poloviny 19. Století, kdy Daniel Colladon ukázal na svých přednáškách vedení světla v laminárním proudu vody vytékající z nádrže. Světlo lapené v proudu vody bylo vedeno úplnými odrazy na rozhraní voda/vzduch a opouštělo tento proud, jen když se dosáhlo turbulentního proudění či tok narazil na pevnou překážku. Od vedení světla vodním proudem přešel výzkum ke skleněným světlovodům, kdy na tuto možnost poukázal francouzský optik Jacques Babinet a navrhl využít zahnutý skleněný světlovod pro osvětlování v zubním lékařství v roce 1842. Přicházely návrhy řady dalších aplikací, z nichž zvýšeného zájmu dosáhly zvláště svazky vláken pro přenos obrazu. Významného milníku bylo dosaženo v 50-tých letech minulého století, kdy B. O'Brien navrhl vylepšení zobrazovacích svazků pro endoskopy pokrytím jednotlivých vláken svazku tenkým pláštěm z materiálu s nižším indexem lomu. Praktická aplikace tohoto vylepšení pak dala prostor k rapidnímu rozšíření optických vláken do širokého spektra aplikací.

Optické vlákno je až na výjimky tvořeno válcově symetrickým vlnovodem z transparentního disperzního materiálu, „jádem“, jež je obklopen optickým obalem s většinou konstantním indexem lomu - „obal“. Úkolem optického vlákna je přivést světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co nejmenšími ztrátami. Na základě zákonů paprskové optiky je zřejmé, že světelný paprsek se při dopadu na rozhraní dvou optických prostředí částečně láme do druhého prostředí a z části se odráží zpět do prvního prostředí. Aby mohlo být světlo vedeno optickým vláknem, musí být do vlákna zavedeno z vnějšího prostředí, kterým je nejčastěji vzduch s indexem lomu 1,00026. Světelný paprsek dopadá na první optické rozhraní vzduch – jádro, jelikož prochází z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí, nastává lom paprsku ke kolmici.

Světelný paprsek prochází jádrem optického vlákna a pod určitým úhlem dopadá na druhé optické rozhraní jádro – plášť. Podle hodnoty úhlu, pod kterým paprsek dopadá na rozhraní jádro – plášť, mohou nastat tři případy. Pokud je úhel dopadu světelného paprsku vzhledem ke kolmici k optickému rozhraní malý pak se část paprsku odráží pod úhlem dopadu zpět do jádra a část paprsku se láme od kolmice pod úhlem menším než 90° . Lomený paprsek vstupuje do pláště, prochází pláštěm a nakonec uniká ven z optického vlákna – červený paprsek na obr. 2. Při tom dochází k vyzáření světelné energie a tím ke ztrátám, které jsou nežádoucí. Pokud je úhel dopadajícího paprsku roven meznímu úhlu nastává obdobná situace jako v prvním případě. Část paprsku se opět odráží pod mezním úhlem zpět do jádra a část paprsku se láme od kolmice pod úhlem rovným 90° . Lomený paprsek se potom šíří po rozhraní pláště a jádra. Poslední možnost je, že úhel dopadajícího

paprsku je větší než mezní úhel, v tomto případě se paprsek zcela odráží pod stejným úhlem zpět do jádra. Nastává totální odraz světla, při němž nedochází k nežádoucím ztrátám světelné energie a účinnost přenosu světla optickým vláknem je nejvyšší.

Až doposud jsme při popisu chování světla v optickém vlákně využívali geometrickou optiku, podle níž se světlo v určitém přiblížení chová jako svazek paprsků. Na jejím základě jsme získali vztah pro velikost úhlu, pod kterými paprsky mohou vstupovat do vlákna, aby byla splněna podmínka pro jejich totální odraz. Ale z jejího popisu vyplývá chybná představa o tom že, všechny paprsky, které vstoupí do vlákna v oblasti akceptačního kužele, postoupí až na jeho konec. Ve skutečnosti je to jinak, protože světlo má vlnový charakter, který geometrická optika nevystihuje. Jedním z projevu vlnového charakteru světla je interference světelných vln, ke které dochází uvnitř vlákna. Z toho vyplývá skutečnost, že jenom část paprsků, které vstupují do vlákna v oblasti akceptačního kužele, projde celým vláknem až k jeho konci. Optickým vláknem se tedy může šířit pouze omezený počet paprsků tzv. vidů (paprsek je aproximací vidu). Podrobnější vysvětlení přesahuje rámec této práce a najdete jej v literatuře [5][3].

1.3 Druhy vláken

Díky možnému širokému využití lze optická vlákna rozdělit do mnoha kategorií:

1.3.1 Základní druhy optických vláken podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny:

1) Skleněná

Skleněná optická vlákna jsou vyrobeny z minimálně 90% SiO_2 (křemene) s možnými dalšími příměsemi. Díky čemuž jsou ovšem poměrně křehká. Využívaná okna jsou 850 nm, 1550 nm. Využívá se na mnohem delší vzdálenosti a to jako jednovidová vlákna.[14]

2) Plastová (POF – Polymer Optical Fiber)

Plastová vlákna se vyznačují větší robustností. Maximální přenos často ve viditelném okně 640 – 780 nm. Plastová vlákna jsou spíše používána jako vícevidová s větším průměrem jádra a výhodnou numerickou aperturou. Mohou být avšak o mnoho tenčí než vlákna skleněná, která potřebují odpovídající ochranu před poškozením [14].

3) **mPOF** (microstructured Polymer Optical Fiber) viz. Strana 11

4) Optická vlákna s křemenným jádrem a plastovým opticky aktivním pláštěm (PCS – Polymer Clad Silica fiber)

1.3.2 Rozdělení podle použití:

- Komunikace
- Senzory
- Přenos světla
 - Osvětlení
 - Spektrometrie, endoskopie
- Zobrazování

1.3.3 Rozdělení vláken podle vidů:

- Jednovidové (Single-mode)
- Několikavidové (Few-mode)
- Mnohavidové (Multi-mode)

1.4 Vlastnosti optických vláken

1.4.1 Rozměry

Rozhodující faktor pro rozměr vyrobeného vlákna je jeho účel. Navíc rozměry přímo ovlivňují chování vláken ve smyslu, zda jsou vícevidová či jednovidová což je patrné na Obrázek 3. Jádra jednovidových vláken se většinou pohybují v rozmezí 8-10 μm a průměr vícevidových nad 10 μm typicky mezi 50 až 100 μm avšak můžou dosahovat i průměru nad 1000 μm . Nejtenčími používanými vlákny jsou tzv. SDOF což jsou vlákna s menším průměrem než jaká je vlnová délka světla, tedy až kolem 100 nanometrů [12].

1.4.2 Index lomu jádra a obalu

Jádro musí mít větší n než obal. Běžné hodnoty jsou 1,52 pro plášť a 1,62 pro jádro. S většími n se ovšem nastává problém s rychlostí šíření a tedy i zpomalení přenášené informace.

1.4.3 Normalizovaná frekvence a počet vedených vidů

Pomocí normalizované frekvence se určuje, kolik vidů bude vlákno vést. Pro normalizovanou frekvenci $V \leq 2,405$ jsou vlákna jednovidová. Počet vidů můžeme ovlivnit

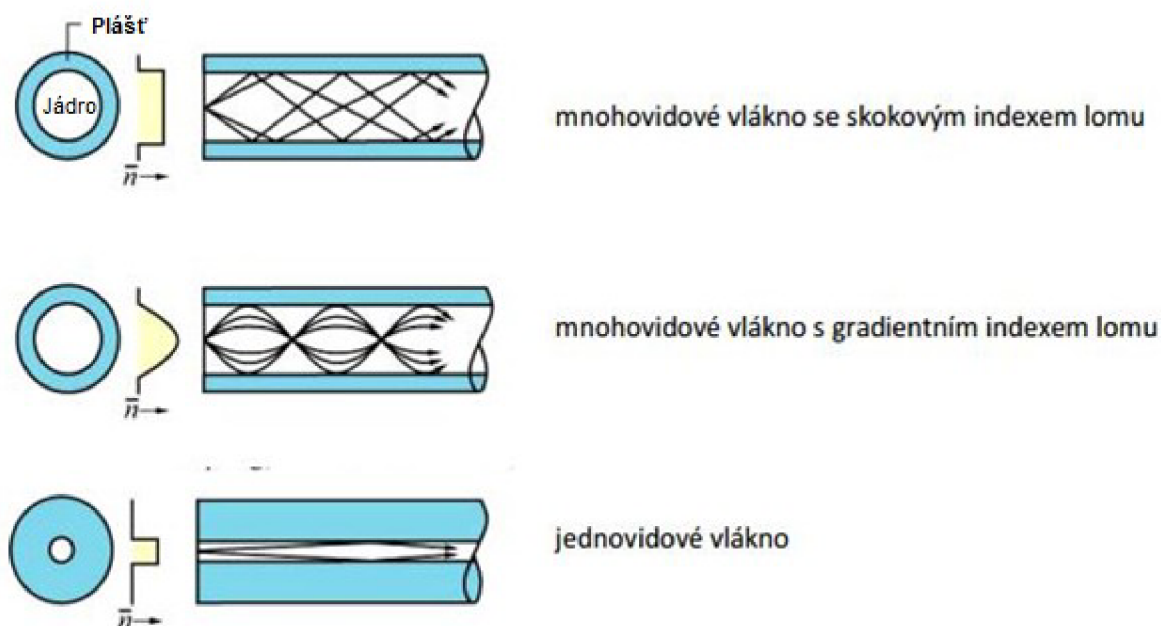
a to pomocí zmenšením průměru jádra a zmenšením numerické apertury a zvýšením vlnové délky.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (4)$$

Normalizovaná frekvence V , a poloměr jádra, n_1 maximální n jádra, n_2 je n homogenního obalu, NA je numerická apertura

1.4.4 Intervidová disperze

Intervidová disperze se udává převrácenou hodnotu maximální frekvence signálů, které můžeme do systému po sobě pustit tak abychom rozpoznali dva po sobě jdoucí paprsky. Jde tedy o přenosovou kapacitu vlákna. Proto mají mnohavidová vlákna se skokovým indexem lomu velkou disperzi a malou přenosovou kapacitu. Optická vlákna s postupným nárůstem indexu lomu byla vytvořena ke zmenšení disperze a tedy i zvýšení kapacity tím, že ke středu postupně narůstá index lomu a signál putující středem vlákna je zpomalen více, než ten který putuje okraji vlákna. Pro úplné odstranění intervidové disperze bylo vyvinuto tzv. jednovidové vlákno. Tímto vláknem putuje pouze jeden vid a není tedy ovlivněn intervidovou disperzí a kapacita vlákna je mnohonásobně vyšší. Všechna vlákna jsou ovlivňována navíc chromatickou a polarizační disperzí a dalšími jevy, které ovšem ovlivňují signál v porovnání s intervidovou disperzí pouze zanedbatelně.

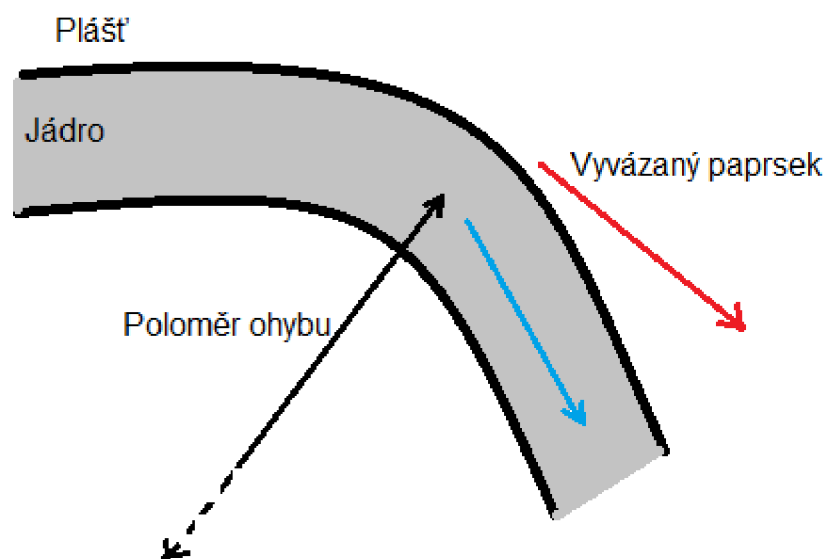


Obrázek 3: Optická vlákna dle vidů [12]

1.4.5 Útlum

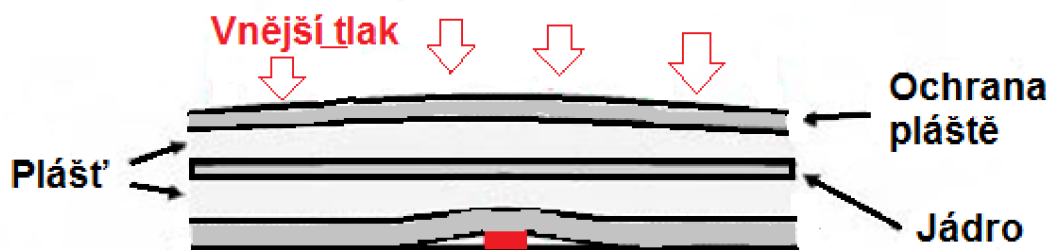
Útlum optického vlákna je vyjádření zmenšení intenzity paprsku mezi dvěma body. Plastová vlákna mají většinou větší útlum než vlákna křemíková.

- Ohyb vlákna
 - Makroohyb - Část vidu (paprsku), která se nachází na vnější straně ohybu vlákna, by se musela šířit větší rychlostí než je rychlost světla v daném prostředí, aby byla splněna podmínka kolmosti vlnoplochy ke směru šíření. Toto není možné a část energie je tudíž z vlákna vyvázána (vyzářena) z vlákna ven.



Obrázek 4: Ztráty způsobené makroohyby

- Mikro - Mikroohybové ztráty jsou způsobené existencí drobných nedokonalostí povrchu vlákna. Závisí na vlnové délce a platí, čím větší vlnová délka tím větší ztráty. Mikroohyb je ohyb, jehož poloměr křivosti je menší než průměr jádra vlákna.



Obrázek 5: Ztráty způsobené mikroohyby

$$\text{útlum v dB} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (5)$$

P_1 je výkon přivedený do vlákna a P_2 je výkon změřený ve vybraném bodě

Několik příkladů výpočtů rovnice [5]:

- 0,3 dB/km = 93,3% přeneseno energie
- 1,0 dB/km = 79,4% energie
- 3,0 dB/km = 50,1% energie

- 10,0 dB/km = 10% energie

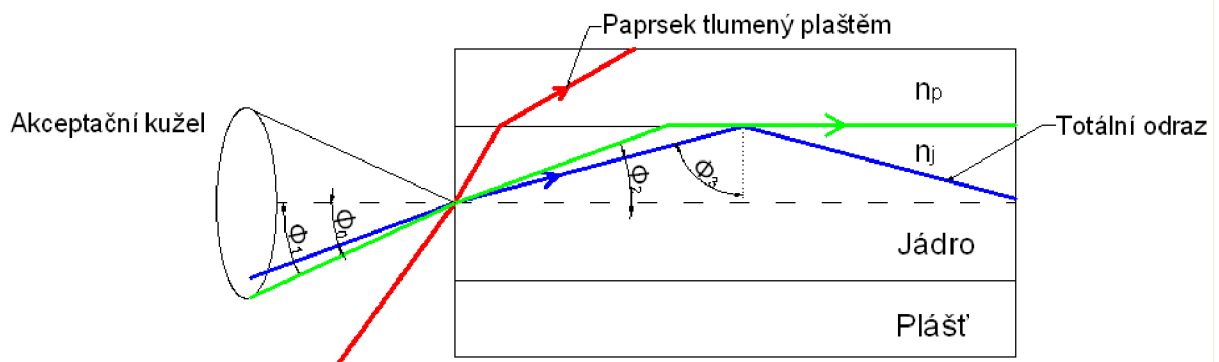
Útlum limituje svým principem možnou efektivně využitelnou délku vlákna. Tento jev je též úzce spjat s vlnovou délkou světelného paprsku, protože různé vlnové délky mají různý útlum. Například standardní jednovidové vlákno má útlum 0,35 dB/km pro vlnovou délku 1310 nm a 0,21 dB/km pro vlnovou délku 1550 nm.

1.4.6 Numerická apertura ‚NA‘

Numerická apertura je sinus poloviny maximálního úhlu, pod kterým můžeme světlo přivést do optického vlákna tak aby bylo dále vedeno bez vyvázání z vlákna. Význam má především při spojování vláken či přivádění signálu do vlákna, protože při špatném navázání světla do vlákna dochází k výrazným ztrátám Obrázek 6. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, udávající pod jakým úhlem se do vlákna navážou či vyzařují paprsky světla o různé intenzitě. Výpočet pomocí rovnice (6).

$$NA = n \sin \theta = \sqrt{n_{\text{jádra}}^2 - n_{\text{obalu}}^2} \quad (6)$$

Vidy mohou být tedy vedené, vyzařující či tunelující v závislosti na NA . Pokud je paprsek navázán při NA menší, než NA vlákna bude vedený v případě, že se naváže při NA větší, bude z vlákna vyzářen. Tunelující vidy jsou pak velice nestabilní a přechází mezi vidy.



Obrázek 6: Schéma numerické apertury [12]

1.5 Speciální optická vlákna

1.5.1 Mikrostrukturní a fotonická optická vlákna

Tomuto druhu vláken dala za vznik výzkumná skupina Philip St. J. Russell v devadesátých letech. To přineslo nové možnosti využití optických vláken. MSF neboli mikrostrukturní optická vlákna mají v celém průběhu délky vlákna vzduchové díry. Rozměry těchto děr jsou většinou velmi malé, přibližně v úrovni jednoho mikrometru. Tyto díry mohou mít různý tvar či rozmístění dle použití. Pokud jsou tyto díry rozmístěny pravidelně a tvoří mřížku, jde o vlákna fotonického krystalu PCF [13]. Takováto mřížka je velmi dobře patrná na vláknech SM 340 a FM 340 jenž jsem zkoumal pod mikroskopem.

1.5.2 Vlákná s dutým jádrem

Tyto jádra s kapilárou jsou především používána v medicíně pro přenos záření v blízké a střední infračervené oblasti vlnových délek. Er:YAG lasery (2,94 μm) a CO₂ lasery (10,6 μm) jsou vedeny právě těmito vlákny s kapilárou a vnitřní stěnou s vysoce odrazivou vrstvou (např. zlatem). Dochází zde však k velkým ztrátám proto se tyto vlákna využívají jen pro velmi krátkou vzdálenost [13].

2 OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY

Neboli optické vláknové senzory jsou definovány jako rozměrem malé přístroje, založené na optických vláknech, schopné nepřetržitě a reverzibilně sledovat změny fyzikálních parametrů či biochemických látek.

Zásadní využití optických senzorů je v prostředích hořlavin, výbušnin a žíravín, jelikož nedochází k průchodu elektrického proudu a nemůže tedy dojít ke vznícení či výbuchu, a také nedochází ke korozi. Jejich velké využití je též v prostředích s elektromagnetickým rušením, také díky elektrické odolnosti. Je třeba si ovšem dát velký pozor na látky degradované světlem, které by mohli ovlivnit vlastní měření, nebo by byly degradovány právě hledané látky, pokud by byly zasaženy vyvazujícími se paprsky z vlákna. Díky malým ztrátám jsou ideální pro použití na velmi dlouhé vzdálenosti a do sta kilometrů není ani nutné v mnoha případech signál zesilovat a tím ho potencionálně znehodnotit. Nepřehlédnutelnou výhodou je i rychlost a kapacita přenesených dat pomocí optických vláken. Navzdory své lehkosti jsou poměrně durabilní a nedegradují. Velkou výhodou pro bezpečnost je komplikovanost napojení se na ně, aniž by bylo napojení detekováno.

Jak je patrné, využití optických vláken má nepřeberné množství kvalit, které lze aplikovat v mnoha aspektech běžného života ale i pro vědecký výzkum. V této práci se snažím o experimentální testování jejich využití v biomedicině jako senzorů.

Využití optovláknového senzoru v medicíně můžeme nalézt například u kontinuálního sledování koncentrace látek v krvi ať už při dialýze, operaci či dlouhodobém sledování. Pohyb pacienta po lůžku, jeho rozložení hmotnosti, tlak v jinak špatně dostupných místech. Kterákoli z těchto měření zatěžuje pacienta minimálně a neobtěžuje ho. Dráždění tkáně je minimální vzhledem k materiálům jak po mechanické tak po chemické stránce. Nevyužívá se ani elektřiny a není třeba žádné speciální izolace, co se týče vlákna.

2.1 Rozdělení optovláknových senzorů

- **Nevlastní senzor** - Vlákno je pouze nositelem světla a proces jeho modulace se nachází mimo něj.
- **Vlastní senzor** - Měřená veličina je snímána přímo pomocí optického vlákna a to změnou jeho schopnosti vést světlo

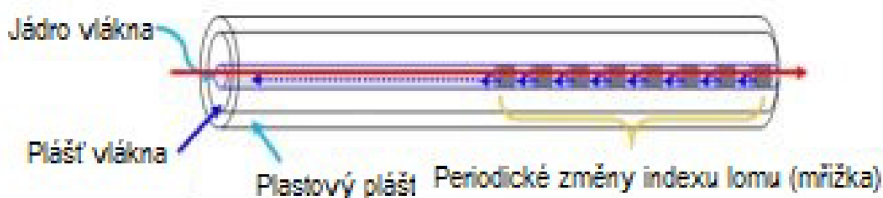
Podle prostorového uspořádání:

- **Bodové senzory** - Bodový slouží k měření v jednom určitém místě své délky
- **Semi-distribuované senzory** - Nebo také mnohabodové měří v mnoha nespojitých bodech po celé své délce
- **Distribuované senzory** - Distribuované měří spojitě po celé své délce

Dále lze senzory rozdělit podle toho, jakou veličinu chceme sledovat, v případě fyzikálních veličin můžeme sledovat: deformaci, elektrický proud, mechanické napětí (statické i dynamické), posuv, vibrace, teplota a tlak. V případě chemických a biochemických senzorů je to například parciální tlak plynů a pH.

2.2 Senzory Braggovou vláknovou mřížkou ,FBG‘

Braggova vláknová mřížka znamená, že uvnitř jádra vlákna je vytvořena difrakční mřížka a to prostorovými změnami indexu lomu. Ta se vytvoří pomocí dvou UV paprsků, které periodicky interferují a ve světlo-citlivém materiálu vytvoří mapu intenzit. Tyto části poté mají různé hodnoty indexu lomu. Délka mřížky může být různá a to od desetin milimetrů až po desítky centimetrů. Nejčastější využívaná pásma při této metodě jsou 1510 nm až 1590 nm. Senzory FBG jsou vnitřní senzory – modulace světla nastává uvnitř mřížky.



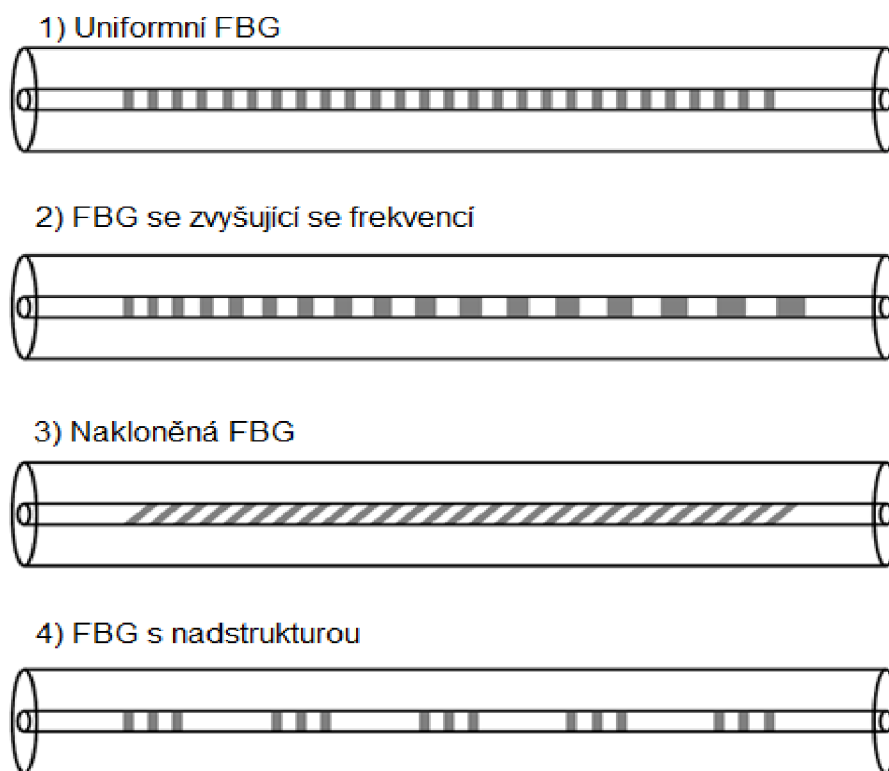
Obrázek 7: Optické vlákno s braggovou mřížkou [13]

$$\lambda_r = 2n_{eff}\Lambda \quad (7)$$

Braggova podmínka: λ_r - odražená vlnová délka, n_{eff} – efektivní index lomu, Λ – perioda mřížky

Při mechanickém namáhání či teplotních změnách se změní optické vlastnosti mřížky, díky čemuž se odrazí jiné vlnové délky. Poté jsme díky kalibraci schopni určit například teplotu či pomocí přenosové funkce jsme schopni určit i tlak či jiné veličiny.

Důležitou vlastností FBG vláken je jejich schopnost být sdružovány sériově či, za použití rozdělovače, paralelně, pokud nepoužíváme monochromatické světlo. Každá mřížka pak musí odpovídat jiné frekvenci.



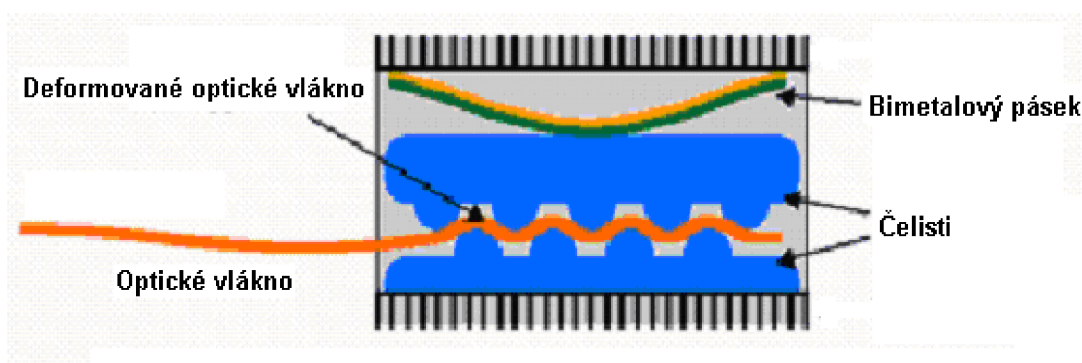
Obrázek 8: Příklady mřížek ve FBG [12]

2.3 Distribuované snímání

Základem distribuovaného snímání je využití celé délky vlákna jako senzoru. Nejčastější využití distribuovaného snímání nalezneme v systémech DTS a DAS.

- DTS (distributed temperature sensing) neboli distribuované snímání teploty. Měření je provedeno pomocí celé délky vlákna s přesností na 1m a přesností na 1°C a rozlišením 0,01°C. Délka může být v některých případech až 30 km.
- DAS (distributed acoustic sensing) je distribuované snímání zvuku. Zvuková vlna je detekována namáháním vlákna a vyhodnocena optoelektrickým zařízením. Využívá se pro dlouhé vzdálenosti a do jinak špatných podmínek.

Distribuované snímání je založeno například na Ramanově, Rayleighově či Brillouinově rozptylu či mikroohybech.



Obrázek 9: Využití mikroohybů pro měření teploty [13]

2.4 Optické vláknové biosenzory

Optický vláknový biosenzor je senzor, který má ve svém detekčním místě biologický optochemický převodník. Interakcí analyzovaného roztoku s převodníkem dochází ke změně optických vlastností v daném místě a tím ke změně výstupního signálu senzoru, který je zaznamenán a vyhodnocen. Jedná se o vlastní senzor [13] a tedy většinou o distribuované snímání, kde se využívá celého vlákna, nebo celé jeho části, jako senzoru.

2.4.1 Využívané látky

Při výběru látek záleží, zda volíme povlak reverzibilní či nereversibilní. Nereversibilní povlak na sebe váže částice, které se vážou tak dlouho, dokud jsou do řeciště dodávány, či přitékají hledané látky. Využití je například pro kumulativní jedy v řecišti. Aby tento proces byl zvrácen, musí se aparatura propláchnout roztokem, který zpětně vychtá navázané částice a purifikuje povlak. V případě neregenerovatelného nereversibilního děje

se částice vychytávají do hledaných látek spíše než na povlak. Tohoto lze využít, pokud hledáme celkové množství látky za čas měření.

Pikrát sodný mění barvu při vystavení kyanidu či kreatininu. Ninhydrin pro zjištění hladin amoniaku a aminokyselin. Využitím kompozitu látek citlivých na změny pH dostaneme spektrum barev pro různé hodnoty pH podobně jako je tomu u takzvaných pH papírků. Dále jsou ovšem látky, které postupně mění odstín barvy pro určení koncentrace hledané látky.

Kovy lze detekovat pomocí chelace, kde se mění zabarvení. Či jiných reakcí kde za přítomnosti kovů, nikoliv výhradně reakcí s nimi, vzniká barevná sloučenina.

Tyto citlivé materiály musí být vázány pomocí polymerové matice. Při tomto použití je žádoucí použít referenční vlákno pro odečtení hodnot. Tento případ by byl využití vlákna jako senzoru jako takového. Těchto barevných změn lze ovšem využít pro měření fyzikálních veličin. Příkladem může být využití tekutých krystalů, které mění své vlastnosti se změnou teploty. Nebo může povrch změnit své vlastnosti a změnit transmisivitu světla, index lomu či vytvořit fluorescenční emisi [13].

V lékařství se například využívají:

Tabulka 1: Příklad enzymatických biosenzorů v lékařství [13]

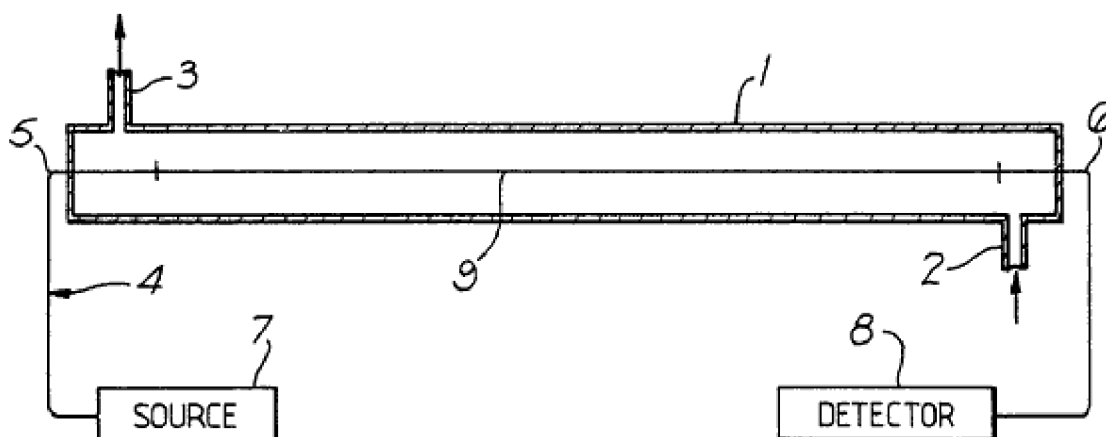
Analyt	Enzym	Matice	Detekován	Převodník
Glukóza	Glukosoxidáza	Akrylamid	Kyslík	$\text{Ru(phen)}_2\text{Cl}_2$
Bilirubin	Bilirubinoxidáza	Akrylamid	Kyslík	$\text{Ru(phen)}_2\text{Cl}_2$
Cholesterol	Cholesteroloxidáza	Grafit	Kyslík	$\text{Ru(phen)}_2\text{Cl}_2$
Penicilin	Penicilináza	PVA	pH	Aminofluorescein
Močovina	Ureáza	PVA	pH	Aminofluorescein

2.5 Absorpční optické vláknové senzory

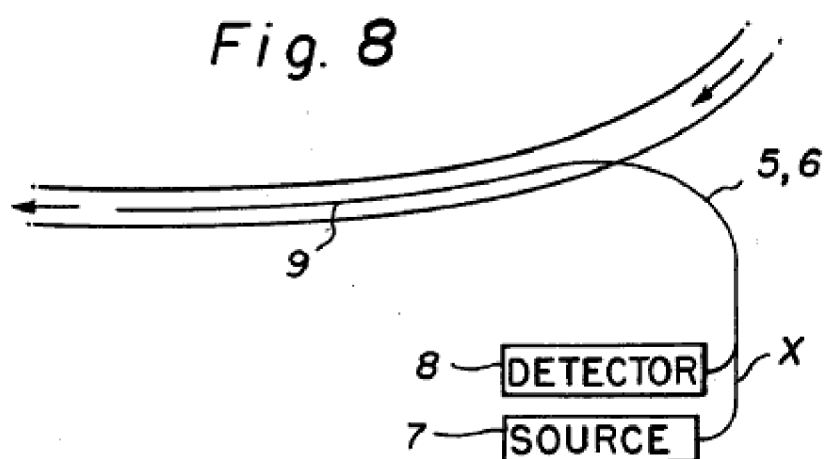
Absorpční optické vláknové senzory jsou příkladem nevlastních senzorů. Využívá se absorpce světla určitých vlnových délek procházejícího specifickým vzorkem viz. Patent Obrázek 12. Dostaneme tedy absorpční pásy ve spektru výstupního signálu. Poloha těchto pásů pak odpovídá struktuře vazeb a je kvalitativním ukazatelem, kvantitativním ukazatelem je pak intenzita pásů z čehož se určí koncentrace přítomnosti analytu. V těchto senzorech se využívá především viditelné a UV oblasti [13]. Může nastat ovšem úplný opak a místo absorpce a následné absence nastane k luminiscenci a je zachycována právě luminiscence. Což může být cílem, ale i nechtěným rušením a znehodnocením.

2.6 Patentovaná řešení senzorů

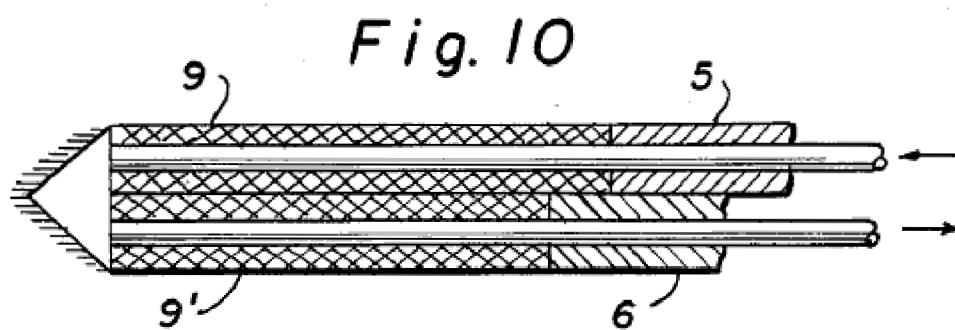
Dvěma základními patentovanými metodami vláknových senzorů byly verze, kdy okolo pevně zafixovaného vlákna obtéká tekutina dle Obrázek 10. Výhodou této verze je poměrně jednoduché řešení a její využití je víceméně zcela mimotělní. Druhá verze je spíše in vivo a jde o zavedení do útroby pouze jedním otvorem, ať už přírodním či umělým viz Obrázek 11. Je využito odrazu na zrcadle a zkoumání tekutin v místě mezi vlákem a zrcadly viz Obrázek 12. Výhodou této verze je právě malá velikost a široká aplikovatelnost, nevýhodou je složitější technologie k jeho výrobě. [2]



Obrázek 10: Možné schéma průtokové verze senzoru



Obrázek 11: Zavedení absorpčního senzoru do řečiště



Obrázek 12: Detail absorpčního senzoru

3 MĚŘENÍ A VLASTNOSTI VLÁKEN

Pro sestavení optického vláknového senzoru bylo vybráno několik vláken od firmy Kiriama. Jedná se o mPOF vlákna. Jmenovitě SM 125 a 340, FM 340 a G3 250 a 340.

3.1 Tabulka vlastností udávaných výrobcem:

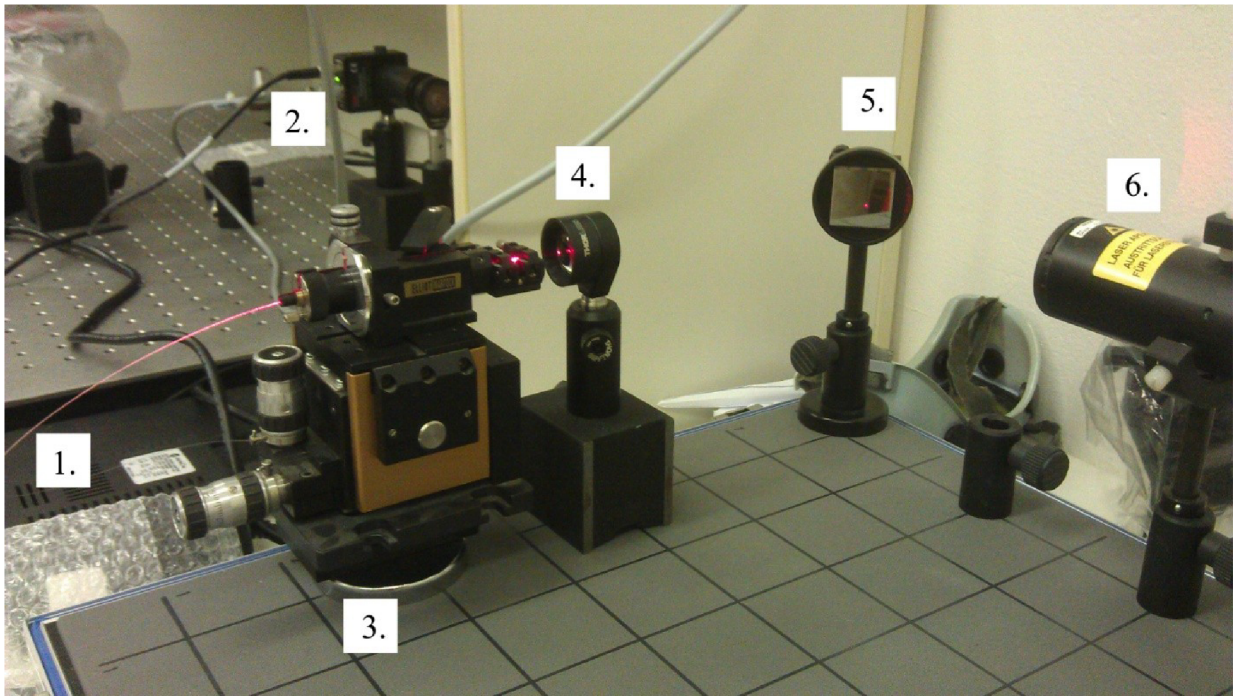
Tabulka 2: Vlastnosti vláken

	G3-250	G3-340	FM-340	SM-125	SM-340
Průměr vlákna [μm]	250	340	340	125	340
Průměr jádra [μm]	34	43	15	6	8
Průměr jádra k vnějším dírkám [μm]	45	60			
Ztráta [dB/m] pro 650nm	0,5	0,4	1,0	1,8	3,8
Mód	Multi	Multi	Few	Single	Single
Materiál jádra	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA
Materiál pláště	PC	PC	PC	PC	PC

3.2 Vlastnosti naměřené v laboratoři

Vlastnosti vybraných vláken jsem ověřoval a zjišťoval v laboratoři. K tomu bylo výhodné použít univerzálního upevnění (Obrázek 14) pro všechna použitá vlákna. Byl využit váleček s otvorem o velmi malém průměru a upevňujícím šroubem. Toto zpracování uchycení má výhodu nejen v univerzalitě co se týče upevnění vláken, ale lze velmi lehce upevnit do držáků optické sady. Dále bylo využito červeného HeNe laseru (632.8 nm) pro nejlepší navázání energie do vlákna, díky jeho vyzařované energii usměrněné do paprsku s malým průměrem.

Dále jsem se potýkal s nedokonalým řezem vlákna. Způsob řezu vlákna byl třeba zdokonalit vzhledem k znečištění a značnému praskání v místě řezu, kterému vlákna podléhala. Za tímto účelem byl využit lámací nůž zahřátý hořákem na teplotu mezi 60-70°C což značně omezilo nutnou sílu potřebnou k uříznutí a tím i deformaci tlakem.



Obrázek 13: Optické pracoviště

Optické pracoviště na Obrázek 13 zobrazuje, které komponenty a v jaké konfiguraci byly použity pro měření numerické apertury všech vláken. Vzestupně dle čísel: 1. Optické vlákno, 2. Detektor a otočné uchycení vlákna se stupnicí, 3. Mikromanipulátor, 4. Čočka s ohniskem 2,5cm, 5. Zrcátko, 6. Laser.



Obrázek 14: Model univerzálního držáku přípravku pro optická vlákna

3.2.1 Numerická apertura

Pro změření numerické apertury bylo využito již zmíněného laseru jako zdroje světla a detektoru fotonů. Po upevnění vlákna a v absolutní tmě se pomocí natáčení držáku a odečítání intenzity pomocí detektoru zjistila numerická apertura jednotlivých vláken jehož detail, je na Obrázek 15. Použití laseru bylo velice výhodné, jelikož detekce méně výkonného paprsku by byla téměř nemožná na některých vláknech.

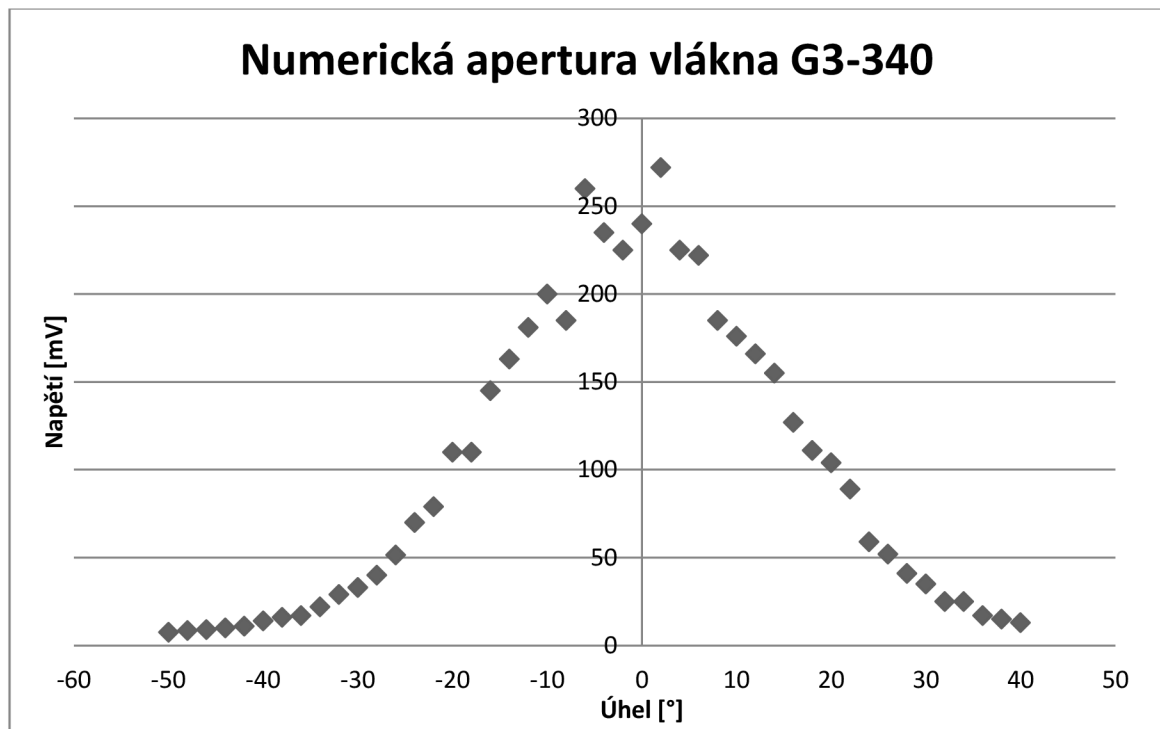


Obrázek 15: Detail vlastního měření NA (detektor vlevo, držák vpravo)

Po naměření všech hodnot intenzity pro různé dopadající úhly jednotlivých vláken a jejich vynesení do tabulek, ze kterých bylo následně možné spočítat numerické apertury. Tyto hodnoty jsou rozepsány v Tabulka 3.

Tabulka 3: Naměřená NA pro všechna použitá vlákna

	G3-250	G3-340	FM-340	SM-125	SM-340
NA	0,574	0,602	0,545	0,5	0,559

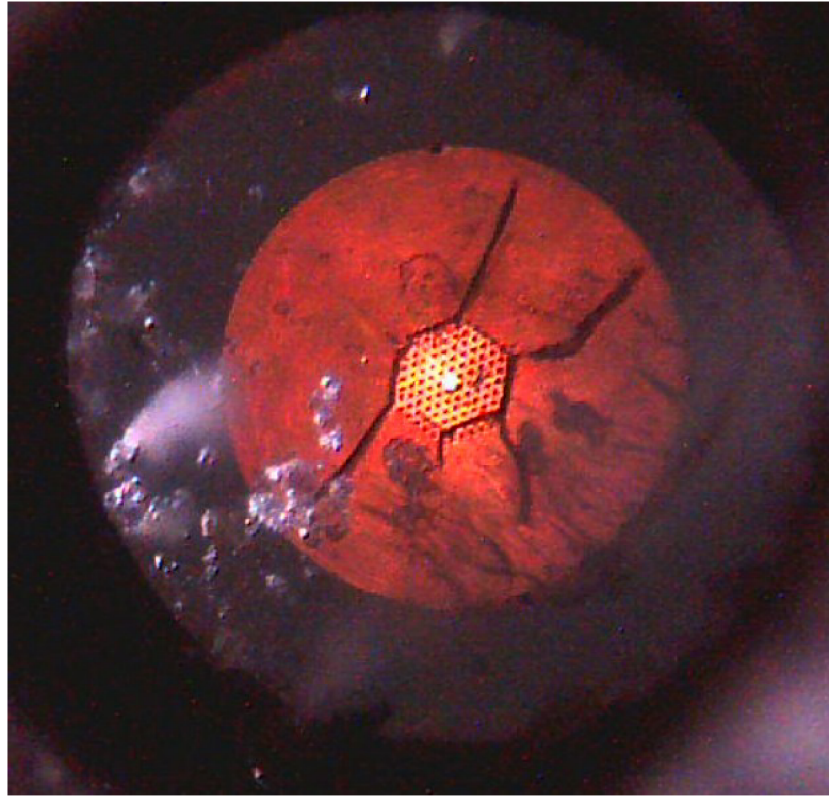


Obrázek 16: Napětí na detektoru v závislosti na natočení vlákna

Na Obrázek 16 je ukázková numerická apertura vlákna G3-340, ze všech vláken se pravděpodobně tato nejvíce přibližuje ideálnímu tvaru.

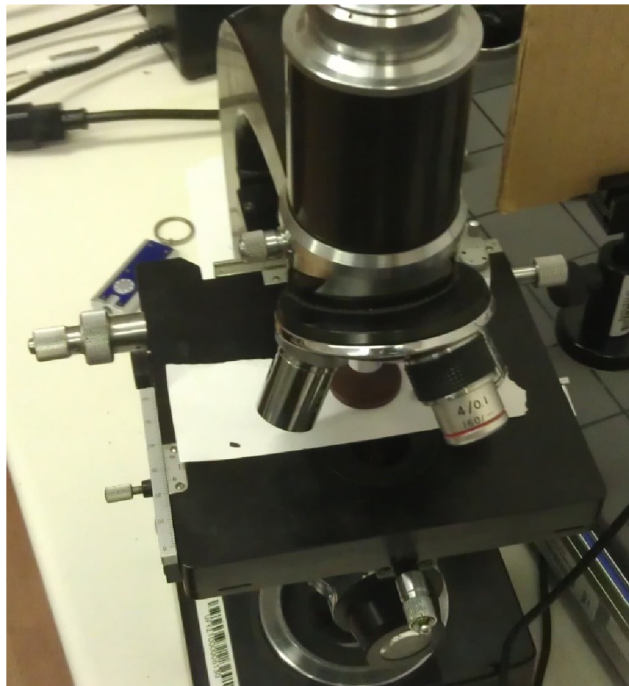
3.2.2 Průřez vlákna a putování světla vláknem

Přivedením jednoho konce vlákna pod optický mikroskop s kamerou pro záznam připojenou k pc a laserem jako zdrojem světla přivedeného do vlákna, bylo možné sledovat řez, mikrostrukturu a světlo vycházející z vlákna. Získané obrázky jsou v příloze druhé. Na získaných snímcích je vidět, že řez není zcela čistý a někdy je jádro vlákna popraskané. Obě tyto nedokonalosti jsou způsobeny řezem vlákna avšak jakékoliv začišťování ať už pomocí etanolu či zabroušení není ideální vzhledem k mikrostruktuře, která by se tímto zanesla ochranou pláště, která je na průřezech vidět.



Obrázek 17: Průřez vláknem SM-340

Vlákno SM-340 bylo z lidského pohledu v průřezu pravděpodobně nejzajímavější, díky krásnému rozdělení pláště kterým neprochází žádné světlo, jádrem kterým prochází část světla a zcela zářící mikrostrukturou.



Obrázek 18: Použitý způsob zkoumání průřezu vláken

4 REALIZACE VLÁKNOVÉHO SENZORU

Důležitou volbou bylo vybrat správnou metodu senzorky. Hlavní dvě realizovatelné možnosti byly využití ohybu vlákna a samovolnému vyvazování světla, druhou byla změna indexu lomu pláště, přesněji tedy odebrání pláště a jeho nahrazení kapalinou.

Zkoušené metody, kdy je vlákno celistvé, byly logicky použity jako první.

4.1 Metody využívající samovolného vyvazování světla z vlákna

4.1.1 Senzorika za použití celistvého vlákna bez ohybu

První experiment zahrnoval senzorku za pomoci neupraveného a nedeformovaného vlákna. Tato metoda byla vybrána jako první z důvodu šetrnosti k vláknům, jelikož nebyla nutnost je nijak deformovat a pravděpodobnost jejich poškození byla na rozdíl od zbytku vybraných metod malá. K částečnému poškození docházelo pouze na konci k detektoru z důvodu upevnění. Bylo postupně použito vláken G3-340 a FM-340 díky snadnějšímu navázání světelného svazku a následně i jeho dobré propustnosti světla těmito vlákny.

Do vláken o délce 1 metr uchycených v mikromanipulátoru byl přes ploskovypouklou spojkovou čočku s ohniskem 2,5 cm navázán červený laser. Druhý konec těchto vláken byl přiveden do detektoru se zesílením 70 dB.

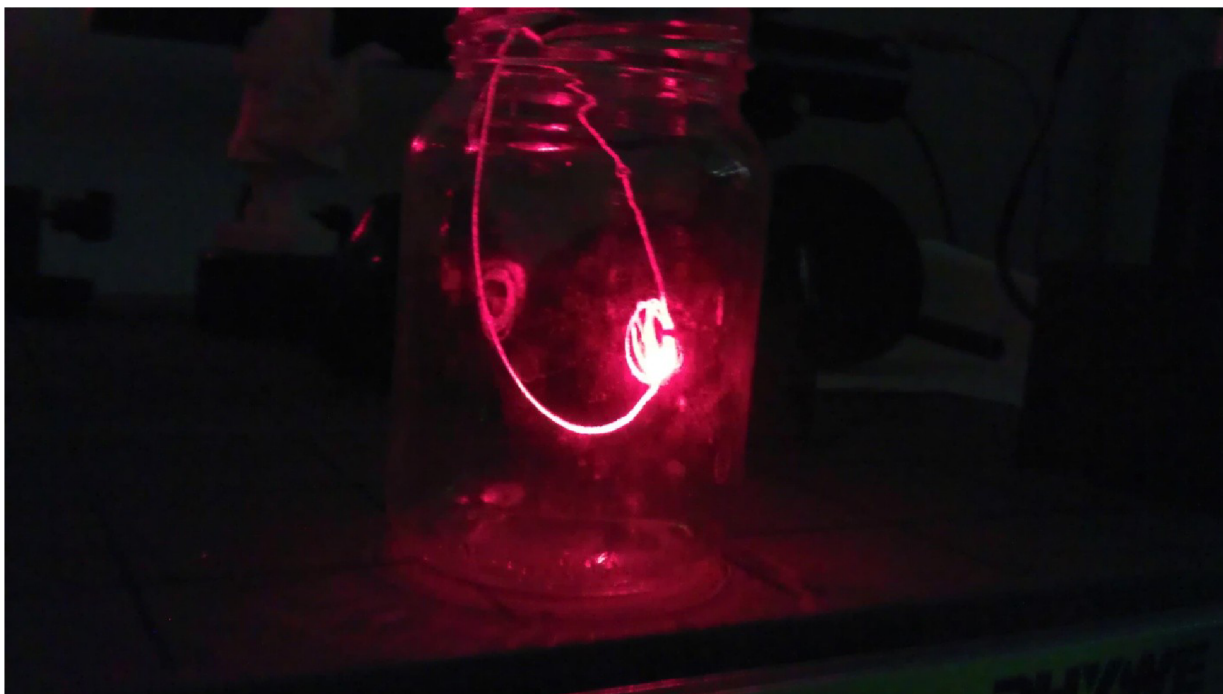
Tyto vlákna byla umístována do lázně s vodou o pokojové teplotě, aby nedocházelo k teplotnímu šoku vlákna a tedy měřitelným hodnotám, a ne ke změnám indexu lomu prostředí. Velký problém však nastal v pohybu vláken, jenž byl registrován na detektoru poměrně výraznými změnami přenosu. Proto jsem vybral jako vhodnější variantu pevné fixace vlákna a jeho následným zalitím vodou.

Tato metoda se však pro všechna vlákna ukázala dle očekávání jako nefunkční s použitými vlákny a přenos nereagoval na změny indexu lomu prostředí ať už ze vzduchu na vodu či následně z vody na vodný roztok glukózy o různých koncentracích. Právě díky poznatku z tohoto pokusu o teplotním šoku a velmi silné odezvě na pohyb, ale i namáhání způsobené vztlakem.

4.1.2 Senzorika za použití celistvého vlákna s fixním poloměrem ohybu

Pro tento experiment jsem vyzkoušel vícero možných fixací vláken právě pro daný poloměr. První zvolenou možností byl pogumovaný drátek, kterým jsem zafixoval nejdříve vlákno G3-340 a posléze FM-340. Vlákno G3-340 bylo smotáno do smyčky o průměru jeden centimetr a s pěti záviny, tyto hodnoty jsem vybral dle zdroje [13]. Tohoto bylo docíleno přilepením drátku za konce na váleček o průměru jeden centimetr a následným těsným ovinutím vláknem G3-340. Konce drátku byly odlepeny a těsně utaženy kleštěmi. Tím vznikl požadovaný poloměr a požadovaný počet závitů. Vlákno je dobře vidět na Obrázek 19: Smyčky vlákna G3-340 uložené v nádobě. Následné měření probíhalo se stejnými podmínkami jako měření předchozí, tedy vlákno nyní již zkrácené právě vytvořením smyček bylo upevněno v mikromanipulátoru a do detektoru. Byl použit stejný laser i čočka s ohniskem 2,5 centimetru.

Právě tímto zkrácením se však zkomplikovalo namáčení, jelikož vlákno nedosáhlo dostatečně daleko k nádobám a museli být přesunuty na optickou desku. Nevýhodou posunutí nádob bylo jejich vyvýšení o optickou desku, ke které jsou uchyceny optické součástky. Tím bylo vlákno více ohýbáno při manipulaci a bylo i mnohem složitější jej uchytit na konci, do kterého vstupoval paprsek, jelikož je v něm vlákno uchyceno přitlakem.



Obrázek 19: Smyčky vlákna G3-340 uložené v nádobě

Avšak ani při velmi opatrné manipulaci jsem nedokázal naměřit kýžené výsledky. I přes sníženou citlivost na ponoření, tedy změn vnitřních napětí vlákna tím, že bylo pevně fixováno do tvaru kruhu. Vláknem bylo stále citlivé do určité míry právě na pohyb, díky napouštění sklenice, a musel jsem čekat, než se vlákno přestane hýbat a ustálí se tedy i hodnoty intenzity světla registrované na detektoru. Vláknem G3-340 však neprojevilo jakoukoliv odezvu na změny indexu lomu při zalití vodou či roztokem glukózy, částečně i pro jeho velmi dobrý přenos. To bylo dokumentováno faktem, jak se později zjistilo, kdy vlákno bylo pevným zafixováním poškozeno, avšak dále fungovalo velmi stabilně.

Stejný postup byl aplikován i pro vlákno FM-340, na kterém bylo vytvořeno pět závinů a následně zafixováno pogumovaným drátem. Vláknem FM-340 ovšem nemělo tak dobré světlo-vodivé vlastnosti v poškozeném stavu a navázání dostatečně silného paprsku světla bylo nadměrně zdlouhavé a složité. I přes velmi dobré navázání ovšem byla intenzita na detektoru velmi malá. Experimentem při kterém bylo vlákno v nádobě zalito nejdříve čistou vodou a později roztoky s různou koncentrací glukózy, jsem však zjistil, že i vlákno FM-340 nefunguje v této metodě.

Následný experiment, který měl tedy za úkol zjistit, zda udávaný průměr je skutečně vhodný pro vybraná vlákna, jako ověření zda pokusy nepřinesli požadovaný výsledek z důvodu špatného průměru či vlastní metodě.

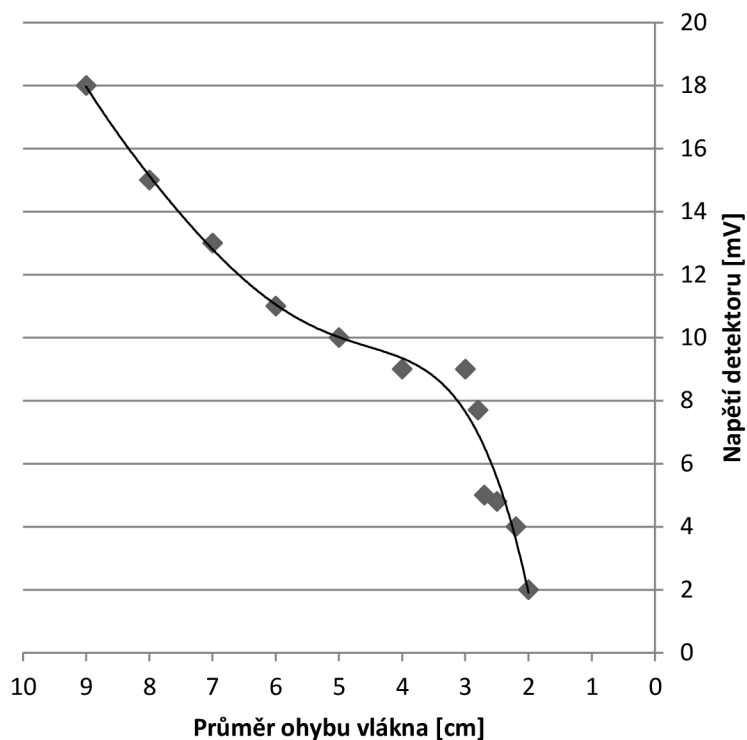
Zde bylo použito vlákno FM-340. Vláknem bylo zapojeno do soustavy a následně jsem na něm udělal smyčku, u které jsem postupně zmenšoval poloměr, až do chvíle kdy se světlo začalo prokazatelně vyvazovat, tedy na detektoru byl skokový úbytek a pouhým okem bylo vidět značné vyvázání. Z grafu na Obrázek 20 je patrný velký pokles přenosu světla při zmenšení průměru ohybu pod 2,8 centimetru. Velký problém s přivedením dostatečnou intenzitu světla na detektor byl vysvětlen tedy i tímto experimentem.

Díky tomuto poznatku jsem provedl experiment s 30 cm dlouhým vláknem FM-340, na kterém jsem vytvořil jednoduchou smyčku o fixním průměru 3,5 cm. Výsledky jak je vidět dle Tabulka 4 výsledky experimentu nejsou dostatečně rozdílné a na těchto hodnotách se nejspíš podílel i vztlak působící na vlákno.

Tabulka 4: Výsledek experimentu vlákna FM-340 s pevným průměrem 3,5cm

obsah nádoby	napětí [mV]
prázdna nádoba	35
voda z kohoutku	37
0,05M roztok glukózy	42
0,09M roztok glukózy	49

Citlivost vlákna FM-340 na ohyb



Obrázek 20: Citlivost vlákna FM-340 na ohyb

4.1.3 Senzorika za použití celistvého vlákna s proměnlivým poloměrem ohybu

Jako návazný experiment na měření s poloměrem 3,5 cm (viz. Tabulka 4) jsem použil stejné roztoky a vlákno FM-340 s jednoduchou smyčkou. Smyčka byla postupně zužována v pravidelných intervalech, tedy půl centimetru, a byla ponořována do připravených roztoků. Tento experiment byl proveden jako ověření, zda se při extrémnějším vyvazování nezachová vodivost vláknem příznivěji, výsledky však vyšli pro cíl pokusu negativně.

Tabulka 5: Citlivost vodivosti vlákna FM-340 na změny poloměru a prostředí

Průměr [cm]	Napětí [mV]			
	Prázdná nádoba	Voda z kohoutku	0,05M roztok glukózy	0,09M Roztok glukózy
3	25	30	39	37
2,5	10	16	15	14,5
2	6,6	5,9	6,4	6,6

4.2 Metody využívající změnu indexu lomu pláště vlákna jeho ubroušením

Tyto metody byly využity až jako poslední jelikož jejich sensorika je založena na vlastním poškození vláken a to pomocí broušení.

Hlavními předvídanou nevýhodou této metody je ztížení manipulace s vláknem díky jeho zvýšené křehkosti avšak vlákno je stále dostatečně pevné jelikož stále má alespoň část pláště.

Zabroušení bylo prováděno pomocí jemného pilníku. Hlavním cílem bylo provést co nejrovnoměrnější zbroušení jedné strany vlákna o délce 1,5 cm. Při realizaci broušení se vyskytlo několik problémů, kdy hlavním byla nutnost nepoškodit celistvost jádra, aby se nezničila jeho geometrie. Toho bylo s co největší možnou přesností s pomocí pouze manuálního broušení dosaženo broušením pod binokulárním mikroskopem s horním svícením. Dalším problémem byla relativní křehkost, která navíc narůstala s postupným broušením. To se projevilo především roztržením či zlomením vlákna při použití větší síly v příčném směru.

4.2.1 Sensorika za použití zabroušeného vlákna bez ohybu

Postup byl zvolen záměrně jako symetrie k předchozím experimentům s celistvým vláknem. Z toho důvodu jsem postupoval co nejvěrněji jako u předchozího experimentu. Bylo využito vlákna FM-340 o délce 30 cm, které se projevilo dobré vlastnosti při navazování světla do průřezu vlákna ale i vyvazování při ohybu. Snahou bylo opatrně ověřit, že vlákno nebylo narušeno broušením takovým způsobem, který by zabránil vedení světla a též zda odpovídá na změny indexu lomu jeho pláště.

Připnutím do mikromanipulátoru a postupným nastavováním aparatury se dostatek světla přivedl do vlákna a byl registrován na detektoru. Postupným ponořováním do vody a roztoků glukózy se měřily změny výstupní intenzity.

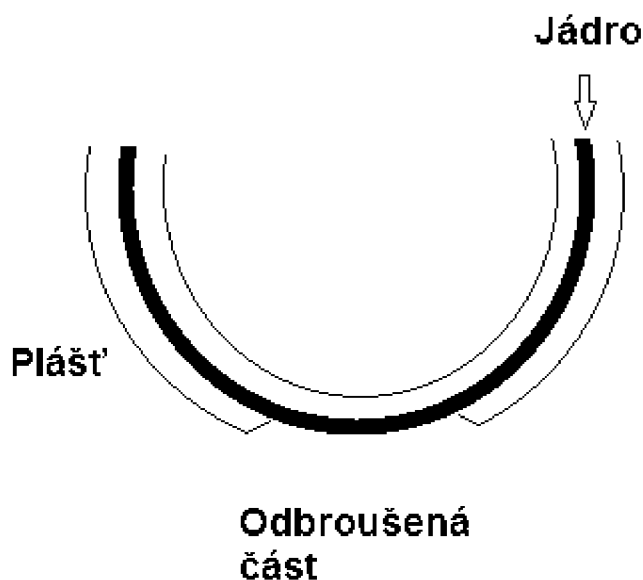
Vlákno si zachovalo svou schopnost vedení světla, avšak vzhledem k problematice navázání určité intenzity světla do vlákna nelze objektivně posoudit, jak velký měla ztráta pláště na vlákno vliv. Intenzity reakcí na změny indexu lomu de facto tedy nového pláště neboli měnicího se prostředí, ve kterém bylo umístěno, však neodpovídali.

4.2.2 Sensorika za použití zabroušeného vlákna s ohybem

Tento postup již vyžadoval delikátnější zacházení z důvodu křehčího vlákna a nutností jej dostatečně ohnout aby se začalo světlo vyvozovat z vlákna v dostatečné intenzitě. Bylo využito již zbroušeného vlákna z předchozího experimentu, bylo jemně

vysušeno a vytvořením ohybu tvaru dle Obrázek 21 o postupně zmenšujících se průměrech.

První komplikace, se kterou jsem se setkal, byla, že vlákno se nyní neohýbalo stejnoměrně a bylo tedy problém vytvořit odpovídající zakřivení v místě broušení. Toto bylo vyřešeno co nejbližším zafixováním k místu broušení.



Obrázek 21: Schéma ohybu ubroušeného vlákna

Jelikož jsem se snažil otočit vlákno se zbroušenou stranou do vnějšího prostoru tedy tam, kde by se světlo vyvazovalo do vnějšího prostoru, vznikla další komplikace a to že i přes velmi blízké zafixování mělo vlákno snahu díky plášti z druhé strany se natáčet touto stranou dovnitř. Tento problém byl vyřešen tím, že se každá část měření udělala v co nejrychlejším tempu, které se dalo považovat za přesné. Jednotlivá měření tím však utrpěla tím, že se různé poloměry vůči sobě dali porovnat ještě v menší míře.

Tabulka 6: Měřené změny intenzit světla v ohnutém vlákně

Poloměr [cm]	Napětí na detektoru [mV]			
	Vzduch	Voda	0,05M Roztok glukózy	0,09M Roztok glukózy
3	154	166	168	167
2,5	52	54	48	55
2	29	25	27	32

Bohužel jak je dobře vidět z Tabulka 6, že tato metoda se ukázala nedostatečně citlivá ani dostatečně věrohodná.

4.3 Metody využívající změnu indexu lomu pláště vlákna jeho odleptáním

Základním předpokladem pro úspěšné provedení tohoto experimentu bylo nutné nalezení správné látky, která je schopná v dostatečné míře a dostatečně rychle odleptat plášť vlákna avšak nesmí poškodit jádro vlákna. Hlavní komplikací bylo, že ač jsem znal materiál, ze kterého jsou oba komponenty vyrobeny, tyto látky jsou dle různých výrobců mírně odlišné ve svých vlastnostech.

Prvním krokem bylo zjistit, které látky jsou dostatečně agresivní k polykarbonátu, ze kterého je plášť a zároveň jsou inertní vůči polymethylmetakrylátu ze kterého je vlákno. V tomto smyslu jsem použil jako orientační materiály americké firmy Bel-Art.

Z jejich tabulek jsem vybral nejdostupnější a zároveň nejefektivnější látky, jenž jsem postupně použil po leptání nařezaných 2cm kousků vlákna FM-340, která jsem vložil do petriho misky a po daných časových intervalech, jmenovitě 10, 20, 50 100, 200 sekundách a dále po 10 minutách pinzetou vyjmul a prohlédl pod mikroskopem.

První vybranou žíravinou byl 40% vodný roztok formaldehydu. Avšak vlákna naproti očekávání nevykazovala ani po deseti minutách sebemenší poškození ať už změnu zabarvení, čírosti ni průměrem.

Další vybranou látkou byl 12% vodný roztok kyseliny etanolové neboli octa. Byl vybrán díky své dostupnosti a dobré manipulovatelnosti a zároveň díky jeho hodnocení v tabulkách. Kyselina etanolová však dopadla zcela stejně jako roztok formaldehydu a ani po více jak deseti minutách nebylo žádné znatelné poškození pláště.

Třetí použitou látkou bylo toluenové ředidlo. Jelikož se jednalo o běžné univerzální rozpouštědlo používané i na plasty doufal jsem v úspěch, avšak efekt mělo zcela opačný a ovlivňovalo pouze jádro, které se v místech řezu po deseti minutách v lázni mírně nabobtnalo.

Po experimentech s leptáním formaldehydem (40%), kyselinou octovou (12%) a toluenem dle materiálů poskytnutých firmou Bel-Art, se však ukázalo, že vlákno je mnohem odolnější na chemické poškození a ani po hodině ponoření nebylo pod mikroskopem žádné viditelné poškození.

Poslední možností tedy bylo použití velmi silných žíravín, čemuž jsem se snažil vyhnout, jelikož jsem nepracoval v chemické laboratoři a neměl jsem odpovídající vybavení pro běžnou manipulaci s nimi, jako je digestoř či pipety. Na výběr jsem měl mezi koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou, hydroxidem sodným a draselným.

Vybrán byl hydroxid draselný, jelikož kyselina chlorovodíková je velmi nebezpečná na dýchací ústrojí při otevřené manipulaci a hydroxid draselný byl v granulcích na rozdíl od hydroxidu sodného, který byl ve formě vloček, se kterými se hůře manipuluje. Nevýhodou a to v případě obou hydroxidů je silná exotermická reakce, se kterou se musí počítat při volbě nádob, ve kterých se připravuje.

Při máčení vláken v koncentrovaném roztoku hydroxidu draselného jsem však zvolil jinou časovou stupnici a to 20, 50, 200 sekund a dále 10, 15, 20 a 30 minut. Po překročení 15 minutové hranice bylo zcela patrné poškození pláště a to ztrátou průzračnosti. Po 30 minutách byl již patrný malý úbytek materiálu.

Použil jsem tedy 30 cm dlouhé vlákno FM-340 a metr dlouhé vlákno G3-340. Pro vlákno FM-340 jsem vybral pouze jedno leptané místo o délce 2 cm. V případě vlákna G3-340 byla vytvořena trojitá smyčka a vlákno tedy bylo naleptáno na třech místech. Vlákna byla leptána protažením vlákna malými otvory v uzavíratelné sklenici naplněné koncentrovanou žiravinou k průniku co nejméně vlhkosti a také kvůli skladovatelnosti.

Takto byla vlákna uložena po dva dny po, kterých jsem provedl kontrolu vláken a promíchal hydroxid draselný, jenž se mezitím vysrážel. Vlákna byla při pohledu pod mikroskopem zřetelně ztenčena, avšak stále bylo dostatek pláště přítomno na vlákně. Dalším časovým intervalem byly čtyři dny. Po této době bylo vlákno dokonale zredukováno pouze na jádro ve vybraném úseku.

4.3.1 Senzorika za pomoci leptaného vlákna bez ohybu

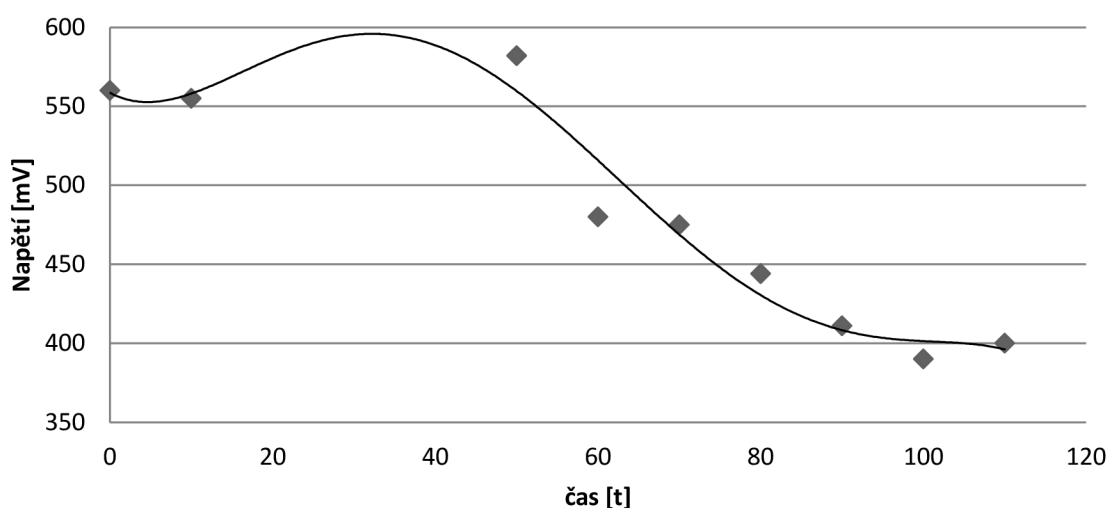
Při sestavování experimentu s použitím vlákna FM-340 s odleptaným úsekem bylo důležité jeho pevné zafixování pro co největší možnou přesnost měření. Vlákno bylo klasicky jedním koncem upevněno do mikromanipulátoru, kde do vlákna vstupuje světlo a na druhé bylo přivedeno do detektoru.



Obrázek 22: Snímací část senzoru s vláknem FM-340

Hlavním rozdílem bylo uchycení v konstrukci z kartonu a malého plastového kalíšku se dvěma malými otvory po obou stranách pro vstup a výstup vlákna dle Obrázek 22. Hlavní výhodou konstrukce byla dobrá upravovatelnost, což se ukázalo při uchycování vlákna a jeho manipulaci do správné polohy aby se nijak nelámalo a nedotýkalo kalíšku. Nevýhoda kartonu na sebe při měření nenechala dlouho čekat a karton byl zmáčen při manipulaci s kapalinou. Kalíšek byl naplňován i vyprazdňován za pomoci pístu injekční stříkačky, což umožnilo rychlé opakování bez nutnosti výrazným způsobem pohnout vláknem, jediná chvíle kdy bylo téměř nezbytně nutné se vlákna dotknout, byla, abych vysál pístem zbytek kapaliny, která se držela zesponu mezi vláknem a kalíškem.

Průběh intenzity po ponoření



Obrázek 23: Průběh změn intenzity po ponoření

Obrázek 23 dobře ilustruje průběh prvního ponoření do kapaliny, tedy přesněji zalití vlákna vodou. Intenzita jako odezva na přechodový děj skokově narostla, poté však rychle začala klesat a smírnou oscilaci se již držela na nižší hladině a to s jasně zaznamatelnou změnou v poměru o více než pětinu své intenzity.

Při použití glukózového roztoku byly změny však minimální hlavně díky malému rozdílu indexů lomu vody a roztoků a výkyvy které se zde vyskytly, se dali považovat za šum, na rozdíl od skokového rozdílu vzduchu a vody.

5 ZÁVĚR

Téma optovláknových senzorů vyžadovalo získání širokých znalostí o světle a jeho vlastnostech, které ve své podstatě zasahují do několika vědních disciplín, a zabralo tedy mnoho času získat dostatečný vědomostní základ, v tomto mi mnoho pomohl doc. Ing. Petr Sedlák, Ph.D., který mě odkazoval a dodával dostatečné množství materiálů pro pochopení všech komplikací provázející světlo a způsobů jeho putování. Navíc jsem měl tu čest se zúčastnit mezinárodní konference fyziků FQMT v Praze, která se soustředila právě na kvantovou fyziku.

Po získání dostatečného množství znalostí mi byla představena laboratoř fotoniky na Ústavu fyziky kde probíhali experimenty. S mírnou instruktáží jsem sestavil pracoviště ze zdroje, který představoval výkonný trubicový laser, mikromanipulátoru do kterého bylo vlákno uchyceno, detektoru a uchycení které drželo vlákno na straně detektoru. Tento speciální úchyt byl využit jako reakce na ceny originální fixací, které se pohybují v desítkách dolarů za kus. Použitý tovar lze navíc požit i při jiných experimentech s vlákny různých druhů a velikostí.

První zásadní problém nastal hned poprvé, když jsem chtěl navázat světlo do vlákna. To se ukázalo jako velice pečlivá práce vyžadující pevné nervy a dostatečně dlouhý čas. I přes nejlepší úsilí se mi nepovedlo navázat dostatečnou intenzitu do vlákna. Vylepšení přinesla čočka usměrňující paprsek laser do velmi malého bodu, a to začátku vlákna. Nehledě na toto zlepšení však navazování signálu do vlákna zůstalo mravenčí a zdlouhavou prací, hlavně u tenčích vláken. Zlepšením by mohl být i citlivější detektor jelikož použitý detektor pracoval s maximálním zesílením a chyby, které se tedy vyskytovali, byli daleko větší.

Všechna základní měření šla jednoduše provést v laboratoři s jejím vybavením, zásadní věci, kterou jsem musel shánět, byly pouze žiraviny, které jinak fotonická laboratoř nevyžaduje.

Pro experimenty byla zvolena speciální vlákna od firmy Kiriama, která v sobě mají zabudovanou mikrostrukturu. Tato vlákna ukázala při experimentech nečekané vlastnosti, jakou jsou citlivost na teplotu či pohyb a to hlavně v případě G3 řady, na ohyb a změnu vnitřních napětí SM řada a zcela jistě by stálo další zkoumání těchto vláken k přispění jiným druhům senzoriky, které však nebyly zadáním této bakalářské práce.

Senzor byl po všech experimentech a testech úspěšně sestaven a ověřila se jeho funkce na zvolených tekutinách. Senzor dokázal rozeznat velké výkyvy, neporadil si, však s drobnými výkyvy což přisuzují použité technice a dostupným technologiím úpravy vláken. Ze všech modelových senzorů je pravděpodobně neslibnější senzor s pláštěm přímo reagujícím na změny prostředí. Ten však nebylo možné právě chybějící technologii vytvořit. V nejnovějších odborné literatuře se objevuje trend nanášet aktivní vrstvu přímo na jádro vlákna a tím zlepšit citlivost a

selektivitu optického senzoru. Aktivní vrstva má afinitu k molekulám detekované látky a výrazně mění svůj index lomu s koncentrací detekované látky [14].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

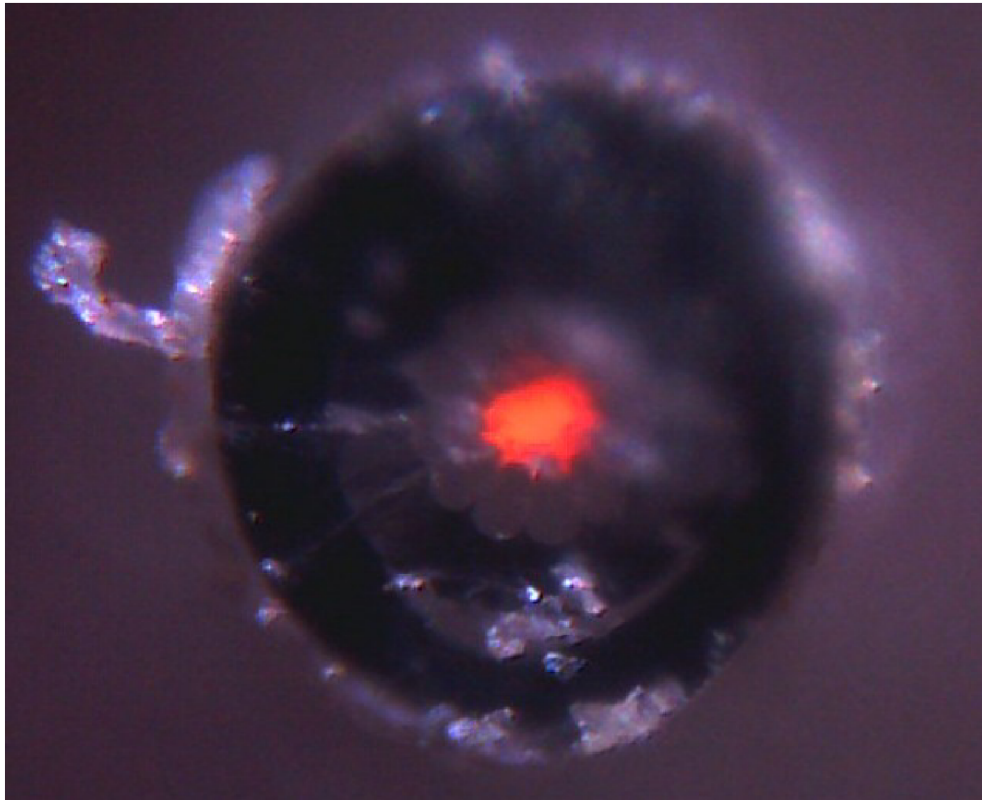
- [1] PETERSON, John I. a Seth R. GOLDSTEIN. *FIBER OPTIC PH PROBE* [patent]. USA. US 4200110 A. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US4200110>
- [2] REID, Robert F. a John H. W. CRAMP. *Optical fibre sensor* [patent]. USA. US 4600310 A. Dostupné z: <http://www.google.cz/patents/US4600310>
- [3] ANGEL, Michael S. *Fiber optic fluid detector* [patent]. USA. US 4834497 A. Dostupné z: <http://www.google.cz/patents/US4834497>
- [4] RAVETTI, Robert G. a Thomas K. DOUGHERTY. *Chemically sensitive fiber optic cable* [patent]. USA. US 5337376 A. Dostupné z: <http://www.google.cz/patents/US4834497>
- [5] DUŠEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. 29. června. 2012. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [6] PETERKA, Jiří. Optická vlákna. In: [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a96/a645k150.php3>
- [7] Fiber optic sensor. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_optic_sensor
- [8] Evanescent wave. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Evanescent_wave
- [9] Matejec. Optické senzory [online]. [cit. 3. 1. 2014] Dostupné z: http://www.ufe.cz/~matejec/docs/opticke_senzory/opticke-senzory-01.pdf
- [10] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. 2006 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [11] *Optická vlákna* [online]. [cit. 2014-02-29]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2562>
- [12] BALDINI, Francesco, CHESTER, HOMOLA a MARTELUCCI. *Optical chemical sensors*. Dordrecht: Springer, c2006, xxxii, 535 p. ISBN 978-140-2046-117.
- [13] POSPÍŠILOVÁ, Marie, Ivan KAŠÍK a Vlastimil MATĚJEC. *Vláknová optika pro biologii a medicínu*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 97 s. ISBN 978-80-01-04807-8.
- [14] BILRO, Lúcia, Nélia ALBERTO, João L. PINTO a Rogério NOGUEIRA. Optical Sensors Based on Plastic Fibers. *Sensors* [online]. 2012, vol. 12, issue 12, s. 12184-12207 [cit. 2014-05-29]. DOI: 10.3390/s120912184. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/12184/>

6 PŘÍLOHY

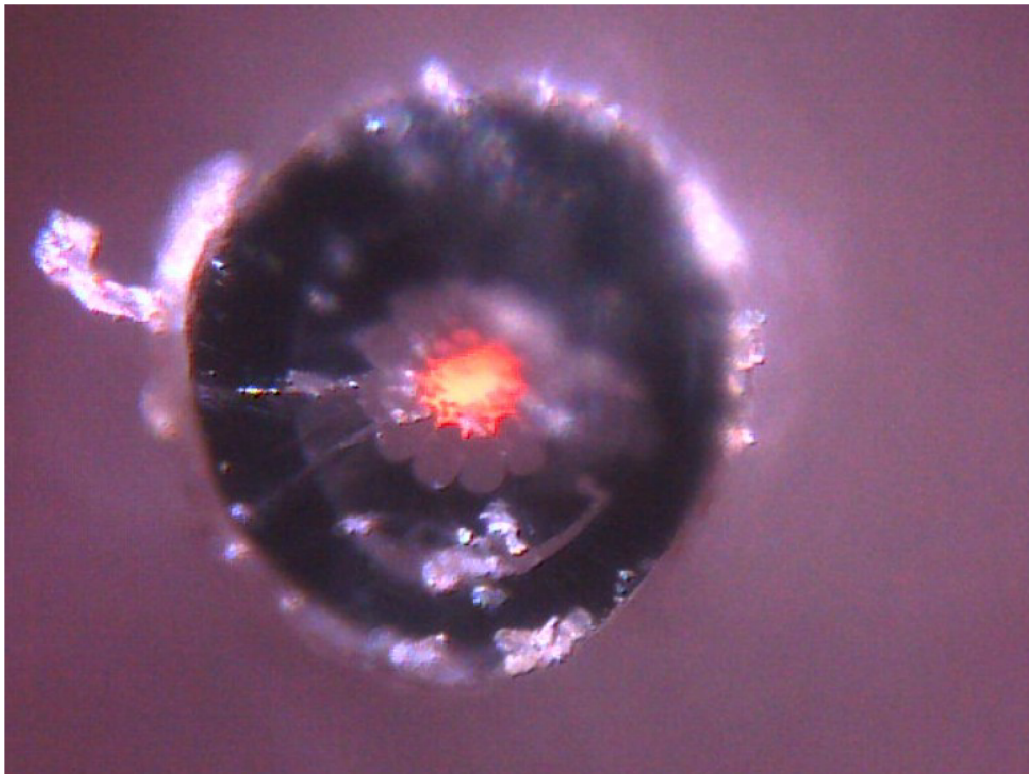
Příloha 1: G3 250	37
Příloha 2: G3 250	38
Příloha 3: FM 340	39
Příloha 4: FM 340	39
Příloha 5: SM 340	40
Příloha 6: SM 340	40
Příloha 7: G3 340	41
Příloha 8: G3 340	41
Příloha 9: SM 125	42

V příloze na CD se nachází foto a video dokumentace a tabulky s grafy měření.

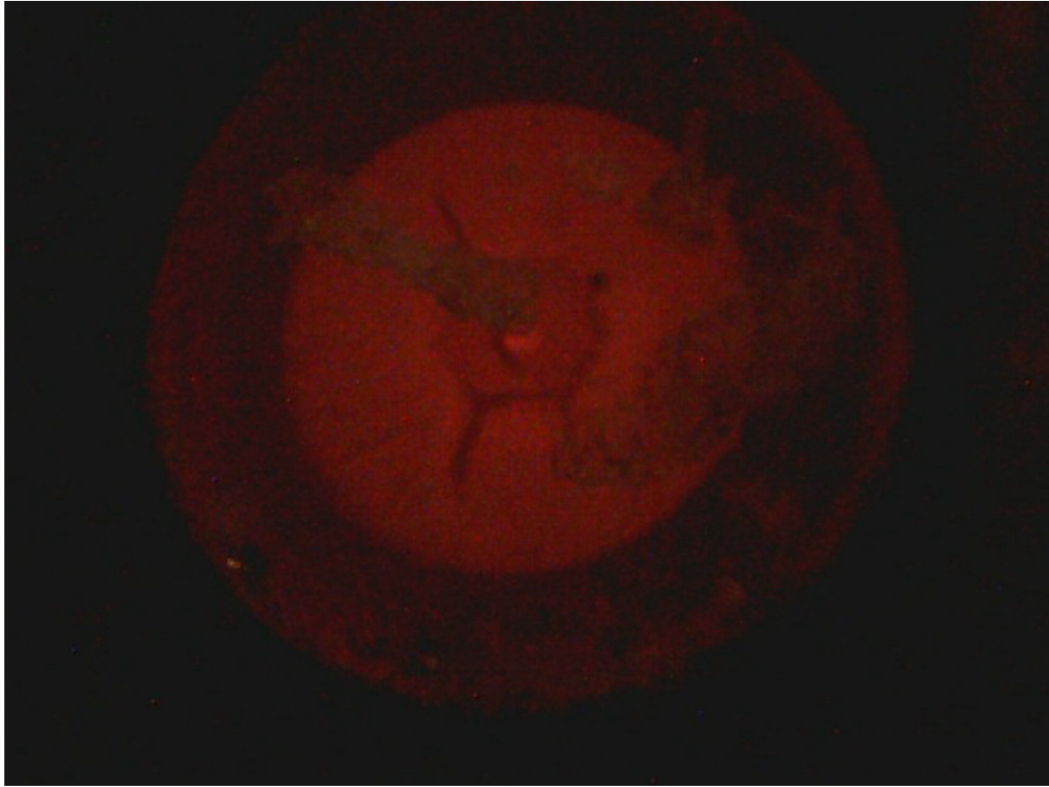
Příloha 1: G3 250



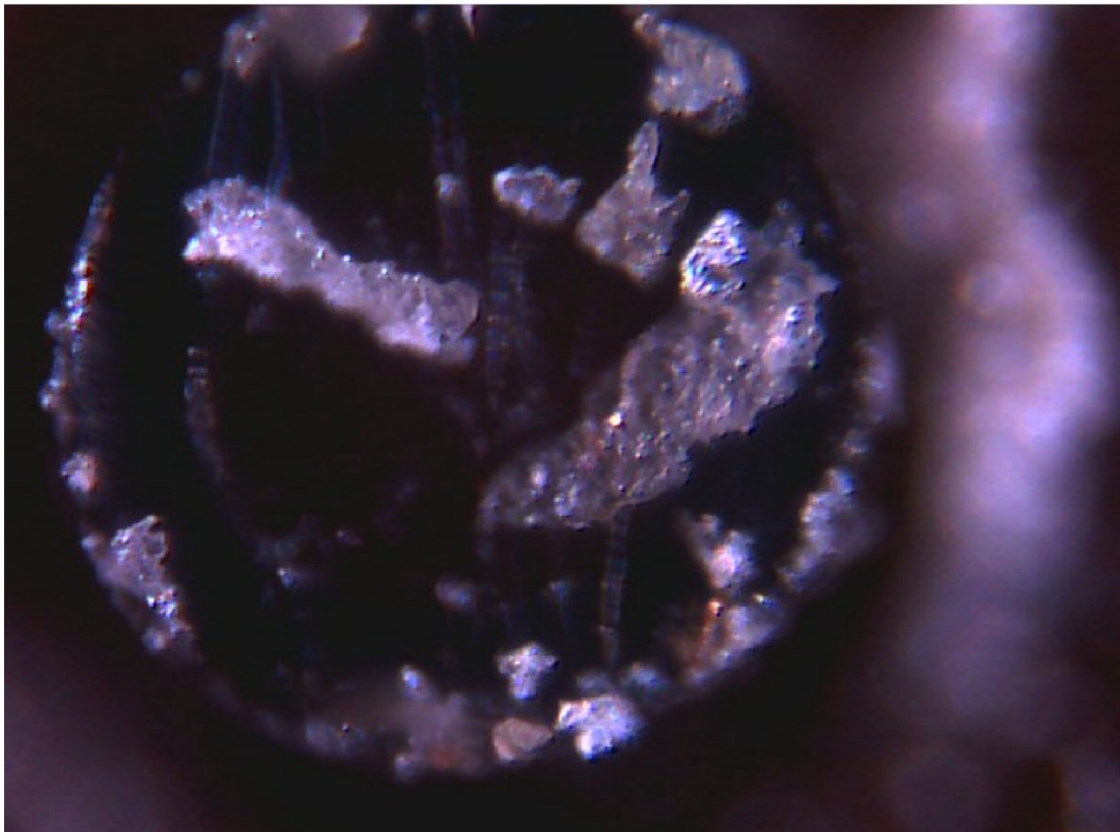
Příloha 2: G3 250



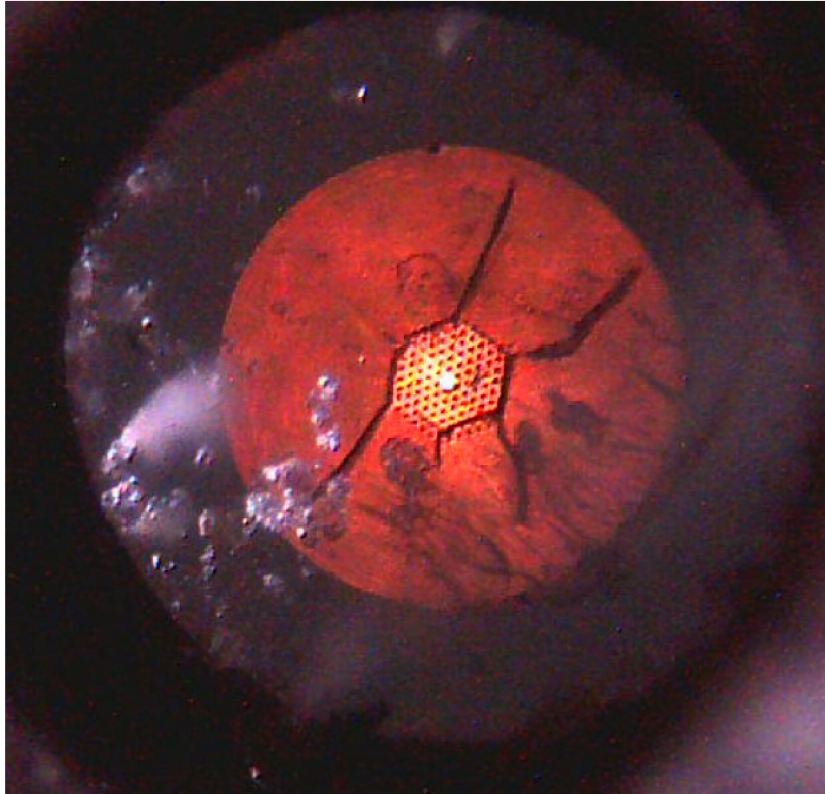
Příloha 3: FM 340



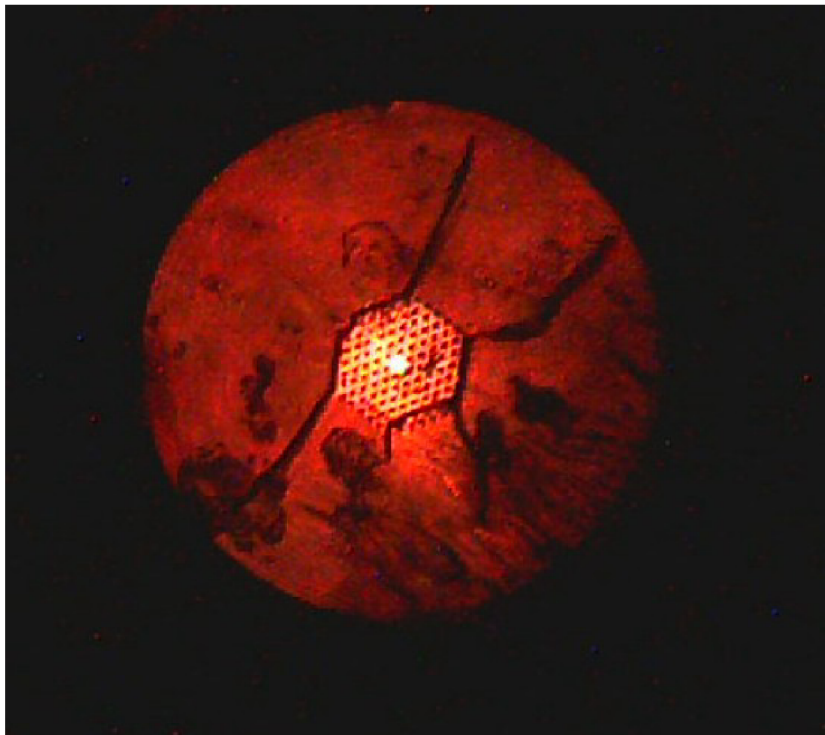
Příloha 4: FM 340



Příloha 5: SM 340



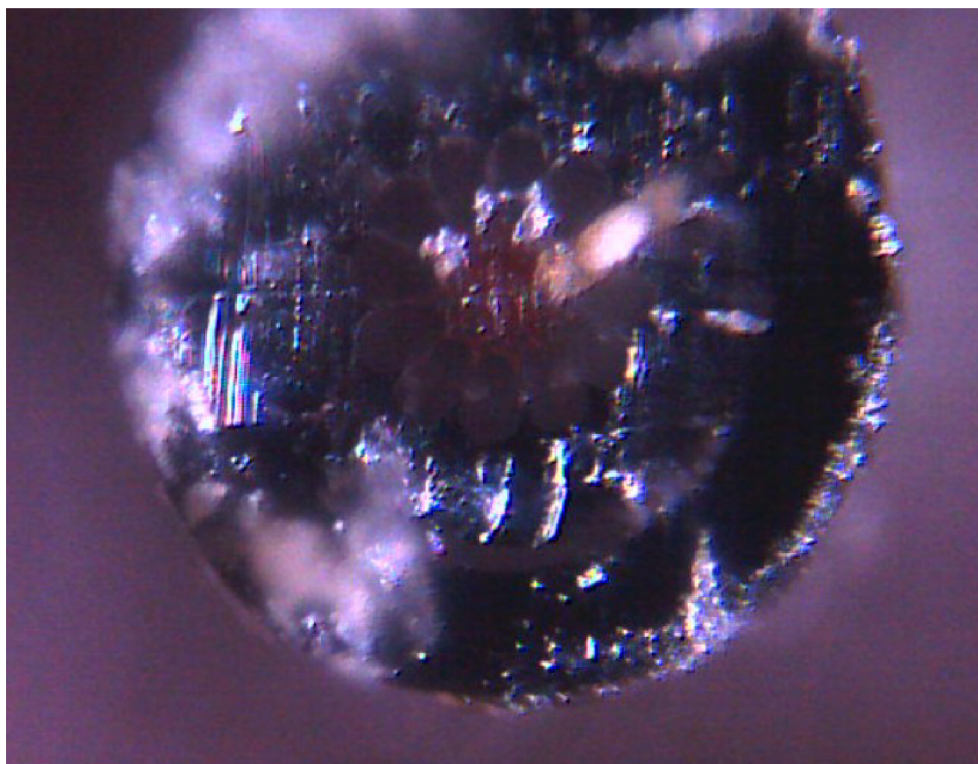
Příloha 6: SM 340



Příloha 7: G3 340



Příloha 8: G3 340



Příloha 9: SM 125

