

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Zuzana Březovská

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Vypracovala: Zuzana Březovská

Studijní obor: Přístrojová optika

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. František Petráš

PALACKY UNIVERSITY IN OLMOUC

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OPTICS

BACHELOR THESIS

OPTICAL FIBER SENSORS

Author: Zuzana Březovská

Academic discipline: Instrumental optics

Supervisor: RNDr. František Petráš

PODĚKOVÁNÍ:

Ráda bych poděkovala RNDr. Františku Petrášovi za odbornou pomoc, ochotu, trpělivost a volný čas při psaní této bakalářské práce. Současně chci poděkovat panu Mgr. Radkovi Čelechovskému, Ph.D, za pomoc při instalaci pikometrického posuvu v laboratoři. Rovněž velký dík patří rodině, přátelům a především prarodičům za podporu, kterou mi věnovali po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, pod vedením
RNDr. Františka Petráše, za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne :

Podpis:

Anotace

Tato práce je věnována obecně optickým vláknovým sensorům, jejich rozdělení podle typů a principů.

Součástí práce je podrobnější analýza vybraného typu optického vláknového senzoru s externím Fabry - Perotovým rezonátorem, který byl v laboratoři zrealizován a experimentálně byl ověřen jeho princip.

Cílem této práce je ověřit, analyzovat a porovnat vlastnosti tohoto typu senzoru, včetně odlišností při použití dvou zdrojů záření s jinými parametry.

Následně byla popsána souvislost koherenční délky zdroje s průběhem změn viditelností interference a jeho periodického opakování v závislosti na posuvu externího zrcátka a porovnání s teoretickým popisem v literatuře.

Klíčová slova:

Optické vláknové senzory, senzor s Fabry – Perotovým rezonátorem, analýza a experimentální ověření vlastností, koherenční délka, viditelnost interference, porovnání s teorií.

Abstract

This thesis deals with optical fiber sensors in general and their partition by type and underlying principle.

The thesis includes a more detailed analysis of a selected fiber optic sensor type with an external Fabry-Perot resonator, which was realized in the laboratory and its principle experimentally verified.

The aim of this work is to verify, analyze and compare properties of this type of sensor, including differences when using two sources of radiation with dissimilar parameters.

Finally, this work describes the relationship between coherence length of the source and changes in visibility of interference, as well as its periodic repetition, induced by movements of the external mirror. The results are then compared to theoretical descriptions in literature.

Keywords:

Optical fiber sensors, sensor with Fabry – Perot resonator, analysis and experimental verification of properties, coherence length, visibility of interference, comparison to theoretical results.

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Optická vlákna	8
2.1 Složení optického vlákna	8
2.1.1 Jádru.....	9
2.1.2 Obal jádra, plášť.....	9
2.1.3 Primární ochrana.....	9
2.1.4 Sekundární ochrana.....	9
2.2 Parametry optických vláken	9
2.2.1 Numerická apertura NA.....	9
2.2.2 Šířka pásma.....	10
2.2.3 Ztráty v optických vláknech	10
2.2.3.1 Ohybové ztráty.....	11
2.2.3.2 Rozptylové ztráty	12
2.2.4 Disperze signálu v jednovidových optických vláknech.....	12
2.2.4.1 Disperzní okna v optických vláknech	13
2.3 Rozložení elektromagnetického pole v optickém vlákne, módy	14
2.3.1 Základní dělení optických vláken	14
2.3.1.1 Jednomódová optická vlákna (SMF)	14
2.3.1.2 Mnohomódová optická vlákna MMF SI.....	15
2.3.1.3 Gradientní optické vlákno MMF GI	16
2.3.1.4 Slabě vodivá vlákna	17
2.4 Materiály a výroba	18
3. Optické vláknové senzory.....	20
3.1 Parametry optických vláknových senzorů.....	21
3.2 Rozdělení optických vláknových senzorů.....	22
3.3 Amplitudová modulace	23
3.3.1 Senzory se změnou útlumu	23
3.3.2 Senzory se změnou indexu lomu	24
3.3.3 Senzory s porušením okrajových podmínek.....	24
3.3.4 Senzory s dynamickou vzájemnou vazbou.....	25
3.3.5 Senzory s emisí záření	25
3.4 Fázová modulace.....	25
3.4.1 Senzory s Machovým - Zehnderovým interferometrem.....	26
3.4.2 Senzory s Michelsonovým interferometrem.....	27
3.4.3 Senzor se Sagnackovým interferometrem	28

3.4.4	Senzor s módovým interferometrem.....	28
3.4.5	Senzory s Fabry - Perotovým interfermetrem.....	29
3.5	Polarizační optické vláknové senzory	30
3.6	Biosenzory s optickými vlákny	31
4.	Senzor s Fabry Perotovým interferometrem - experimentální ověření.....	33
4.1	Analýza a výsledky měření experimentu	34
4.2	Souvislosti s koherenčními vlastnostmi zdrojů	37
4.3	Dokumentace experimentálního měření.....	41
5.	Závěr	44
6.	Seznam literatury	46
7.	Seznam obrázků.....	49

1. Úvod

Optické vláknové senzory jsou optoelektronická zařízení, která umožňují snímat změny různých fyzikálních veličin. Optickým vláknovým sensorům je v posledních desetiletích věnována velká pozornost pro jejich užitečné aplikace v laboratořích, průmyslu, zdravotnictví a v oborech jako je biofyzika a chemie. Zajímavé aplikace je možné nalézt také například v armádě a navigačních systémech v letectví.

V první kapitole se budeme věnovat optickým vláknům, jejich rozdělení, základním parametrům a principům přenosu optického signálu vláknem.

V následující kapitole budou obecně rozděleny optické senzory. Dozvíme se zde o využití jednotlivých sensorů a principech snímání a vyhodnocování dat.

A v závěru této práce se budeme zabývat kategoriemi optických vláknových sensorů, které jsou založeny na principu vyhodnocení fáze, konkrétně konstrukcí senzoru s Fabry – Perotovým rezonátorem. V rámci experimentální realizace se zaměříme na analýzu a popis senzoru s Fabry – Perotovým rezonátorem s externím zrcadlem. Experimentální výsledky mohou být využity při konkrétní aplikaci takového typu senzoru.

2. Optická vlákna

Konstrukce optických vláknových senzorů je založena na využití vlastností optických vláken. Optická vlákna můžeme využít k přenosu dat nebo jako samotný snímací prvek, který mění své přenosové vlastnosti vlivem změn způsobených vnější fyzikální veličinou.

Princip vedení záření jádrem optického vlákna je založen na využití zákonitosti totálního odrazu, na rozhraní mezi jádrem a obalem.

Jádro optického vlákna je tvořeno křemenným sklem, přičemž rozdíl indexů lomu mezi jádrem a obalem je malý.

Pro navázání záření jádra vlákna je pro nás důležitý parametr NA - numerická apertura, který určuje, pod jakým úhlem je vlákno schopno navázat záření do svého jádra, aby záření bylo vedené. Tento úhel se vyjadřuje pomocí Snellova zákona.

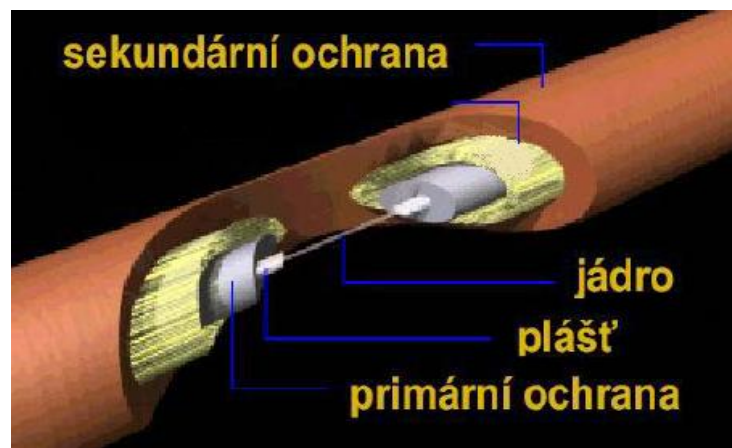
V datových komunikacích obecně je přenos zprostředkován optickými impulsy, které jsou generovány vysílačem na vstupu, na výstupu poté detekovány fotodetektorem a následně je světelný impuls převeden detekcí na elektrický signál [1,2].

2.1 Složení optického vlákna

Optická vlákna jsou složena ze tří částí, které mají různý index lomu (obr. 1):

1. Jádro
2. Obal jádra (plášť)
3. Primární obal
4. Sekundární obal

[2]



Obr. 1: Složení optického vlákna [1]

2.1.1 Jádru

Jádru je nejpodstatnější částí optického vlnovodu, protože se jádrem šíří paprsek po celé délce. Hodnota indexu lomu jádra je větší, než index lomu obalu. Rozměr jádra se pohybuje od 5-10 μm [2].

2.1.2 Obal jádra, plášť

Obal jádra má index lomu nižší, než samotné jádro. Obal zajišťuje podmínku totálního odrazu.

Jeho rozměr je například 125 μm a indexu lomu $n = 1,46$. Tato vrstva umožňuje vedení záření [1,2].

2.1.3 Primární ochrana

Již z názvu "primární" je zřejmé, že se jedná o prvotní ochranu tvořenou akrylovým lakem jádra, která ochraňuje jádro a zabraňuje vnějším vlivům před jeho poškozením.

Úkolem ochranné vrstvy vlákna je zvyšovat odolnost proti ohybům. Šířka jádra i obalu tvoří průměr 250 μm [1,2].

2.1.4 Sekundární ochrana

Sekundární ochrana slouží především k ochraně vlákna před mechanickým namáháním nebo chemickým působením v okolí.

Průměr této plastické vrstvy činí 900 μm . Sekundární ochrana nemusí být součástí optických vláken [2,3].

2.2 Parametry optických vláken

Mezi základní parametry optických vláken patří:

1. Numerická apertura NA
2. Šířka pásma
3. Ztráty
4. Disperze [2]

2.2.1 Numerická apertura NA

Numerická apertura představuje bezrozměrnou veličinu, která udává největší úhel, pod kterým paprsek může vstoupit do vlákna (obr. 2). Nejvyšší hodnota $NA = 1$. Obvykle bývá tato hodnota nižší. NA, lze vyjádřit:

$$NA = \sin\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.1)$$

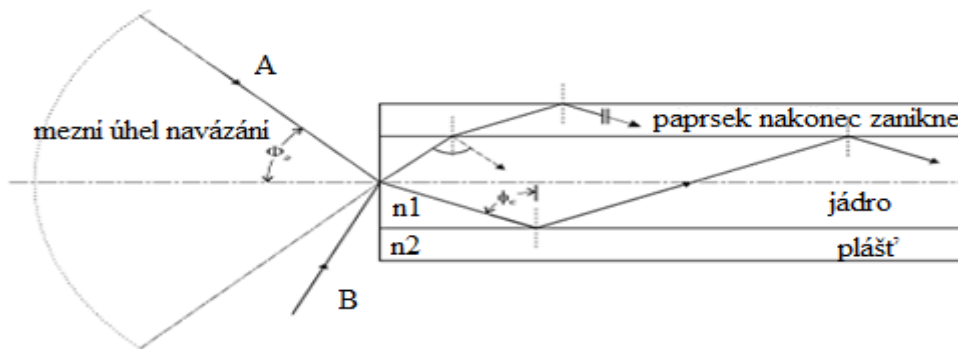
n_1 = index lomu jádra

n_2 = index lomu pláště

θ_a = maximální úhel, pod kterým se paprsek šíří ve vlákne

Jestliže úhel θ_a bude větší, energie přejde i do vrstvy obalu a bude vyzářena formou vyzářených módů.

Důležitá je zde podmínka úplného odrazu na rozhraní jádro-plášť (obr. 15).



Obr. 2: Šíření paprsku a vstupující paprsek pod NA [2]

[5]

2.2.2 Šířka pásma

Tento parametr představuje frekvenční rozsah signálu, které dané optické vlákno dovede spolehlivě přenést. Udává se v jednotkách MHz na jednotku vzdálenosti.

Šířka pásma souvisí na celkovém konstrukčním uspořádání a rovněž na materiálu jádra optického vlákna a vlnové délce zdroje [4].

2.2.3 Ztráty v optických vláknech

Optická vlákna představují pro záření ztrátové a disperzní prostředí. Tyto vlastnosti se ve výsledku projevují jako útlum optického signálu, při průchodu jádrem optického vlákna a současně jeho rozprostřením v čase. Útlum umožňuje vyjádřit rozdíl intenzity signálu mezi vstupem a výstupem vlákna. Útlum je vyjádřen v *dB*. Čím nižší bude útlum, tím účinnější bude přenos signálu. Útlum je závislý na vlnové délce [3,5].

Útlum je obecně způsoben:

1. Nevlastní absorpcí – způsobují ji nečistoty v optickém vlákne.
2. Lineárním rozptylem – útlum vzniká při nepřesném a nerovnoměrném oddělení jádra a obalu.
3. Nelineárním rozptylem – útlum je zapříčiněn změnou vlnové délky záření.
4. Ztráty ohybem – působí nepříznivě při ohybu vlákna, obzvlášť u jednovidových vláken, pouze část energie je navázána.
5. Vlastní absorpce – útlum vzniká v molekulách materiálu optického vlákna.

Útlum přenášeného výkonu optickým vláknem lze matematicky vyjádřit:

$$A(\lambda) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad [dB] \quad (2.2)$$

P_{out} = Výstupní výkon

P_{in} = Vstupní výkon

Útlum optického vlákna:

$$A(\lambda)_{(dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (2.3)[4]$$

Významným parametrem útlumu vláken je koeficient útlumu, jenž vyjadřuje útlum vztažený na jednotkovou délku vlákna.

Koeficient útlumu:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad [dB/km] \quad (2.4)$$

L = délka optického vlákna (km)

[6,7]

Ztráty jsou rozdělovány do třech skupin:

1. Ohybové ztráty
2. Rozptylové ztráty
3. Disperzní ztráty [4]

2.2.3.1 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty jsou zapříčiněny porušením podmínky totálního odrazu.

To znamená, že při ohybu dojde ke změně úhlu šíření paprsku, potom paprsek dopadá pod větším úhlem na rozhraní a paprsek se následně šíří i do vrstvy pláště.

K ohybovým ztrátám přispívá i takzvaný fotoelastický jev. Index lomu se mění při ohybu vzniklým tlakem. Tento jev se rozděluje do dvou skupin a to: makroohyb a mikroohyb.

Tyto jevy je možno snížit zkrácením vlnové délky λ nebo je nutné navrhnout trasu s velkým zakřivením. Na druhou stranu nemusí vždy hrát roli negativní. Mohou sloužit i k odfiltrování vyšších energetických módů. Jsou využívány při měření [4].

2.2.3.2 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty vznikají rozložením nehomogenit, z čehož plyne, že tyto ztráty nelze odstranit ani potlačit [12].

Tyto ztráty se dělí do tří skupin:

1. Rayleigho rozptyl
2. Mieyův rozptyl
3. Rozptyl na nečistotách [4]

Rayleigho rozptyl

Tento jev vzniká v oknech optické komunikace. Rayleigho rozptyl vzniká díky tepelným kmitům krystalických mřížek. Bohužel tento jev nelze odstranit, ale posuvem pracovní frekvence o IČ oblasti jej lze alespoň částečně snížit [4].

Mieyův rozptyl

Je výsledkem mikroskopických bublin ve vlákne, kolísáním průměru jádra či napětí ve vlákne. Nicméně tento jev lze připisovat nehomogenním látkám, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou λ [4].

2.2.4 Disperze signálu v jednovidových optických vláknech

Disperzní ztráty nelze brát jako ztráty, jelikož u nich nevzniká úbytek energie, ale dochází k rozptření energie v čase.

V jednovidových optických vláknech je signál přenášen dominantním módem LP_{01} . Tento mód je tvořen dvěma degenerovanými módy s navzájem ortogonální polarizací. Rozdíl doby šíření obou degenerovaných vidů je menší než 0,05 ps/km,

a proto se při jednovidovém přenosu tato **mezividová** disperze obecně limitující přenosovou kapacitu mnohavidových vlnodů významně neuplatňuje. V případě lineárně polarizovaných módů je možné tuto disperzi vyjádřit jako **polarizační** disperzi [12].

Optický signál přenášený jednovidovým optickým vláknem má vždy nenulovou šířku pásma. Ta je určena šířkou spektrální čáry zdroje záření. Protože index lomu

křemenných skel používaných při přípravě optických vláken je závislý na vlnové délce λ přenášeného záření, šíří se jednotlivé spektrální složky signálu s rozdílnými skupinovými rychlostmi a tak dochází ke zkreslení, které je úměrné šířce spektra signálu. Tento jev se nazývá **materiálová disperze**. Kromě toho závisí na rozložení na vlnové délce záření, také rozložení elektromagnetického pole vidu LP_{01} a tudíž jeho konstanta šíření. Tento jev - **vlnododová disperze** je příčinou zkreslení, které je rovněž úměrné šířce spektra signálu. Příspěvky materiálové a vlnododné disperze ke zkreslení přenášeného signálu nelze experimentálně oddělit. Jsou souhrnně označovány jako **chromatická disperze** [12].

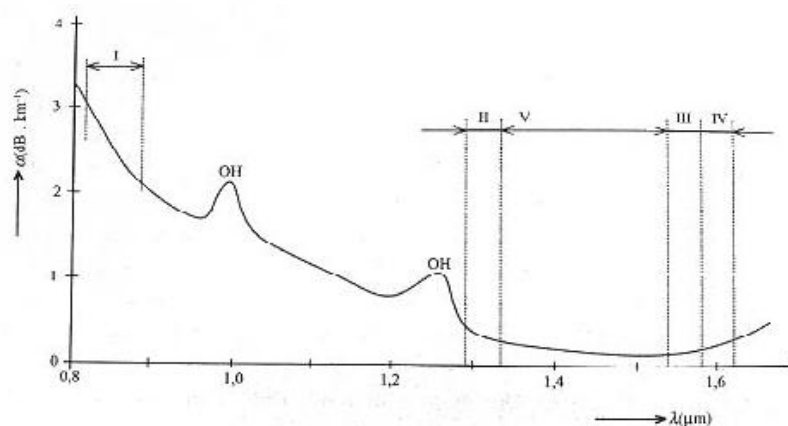
Aby se zamezilo vzniku chromatické disperze, je nutné přizpůsobit profil indexu lomu tak, aby docházelo ke kompenzaci obou disperzí [11].

Módovou disperzi mohou potlačovat vlákna s gradientním průběhem indexů lomu, což umožňuje neomezovat přenosovou kapacitu optické trasy. Je typická pro mnohamódová vlákna, jelikož módy jsou šířené různými grupovými rychlostmi. Způsobuje časové rozšíření vedeného impulsu, tudíž omezuje přenosovou rychlost [13].

2.2.4.1 Disperzní okna v optických vláknech

Materiály optických vláken vykazují několik maxim, mezi nimiž se nachází úseky s nižším útlumem. Tyto úseky nazýváme okna a jejich průběh je vidět na (obr. 3).

Celková disperzní charakteristika obsahuje 5 oken. Tato charakteristika je vyjádřena bez omezení zapříčiněnou absorpcí fotonů na hydroxidových iontech (OH) (v oblasti 2700 – 4200 nm a vyšší harmonické 1380 nm) [7,8].



Obr. 3: Charakteristika útlumu - okna [3]

- I.okno – Útlumová charakteristika silně klesá v oblasti 850 nm. Využívá se při mnohavidovém šíření. Dosahová hodnota v dálkových přenosech je velmi vysoká.
- II.okno – Se nachází v oblasti 1280 – 1335 nm. Využívá se v jednovidových přenosech. Je to úsek nejnižšího okna. Toto okno je využíváno v dálkových přenosech.
- III.okno – Je využíváno v případě křemenných optických vláken. Toto vlákno odpovídá oblasti 1530 – 1565 nm. Využívá se pro dálkové přenosy.
- IV.okno – Odpovídá oblasti 1565 – 1625 nm. Toto okno lze nalézt za minimem měrného útlumu.
- V.okno – Začalo se využívat od konce 90.let. Souvislý přenosový kanál je tvořen spojením II. – V. okna [8].

2.3 Rozložení elektromagnetického pole v optickém vlákně, módy

Záření se ve vláknovém vlnovodu šíří ve formě specifických konfigurací, takzvaných módů. Interferencí dopadajících a totálně odražených prostorově omezených vln vzniká stojaté vlnění v příčném směru (kolmo k ose z vlákna) a postupné vlnění ve směru osy. Každému vedenému módu odpovídá diskrétní hodnota podélné konstanty šíření β , spektrum vytékajících módů je spojité. Mód si při šíření ideálním vláknem zachovává stálé příčné rozložení a polarizaci. Přesné rozložení pole módu lze určit řešením Maxwellových rovnic pro nemagnetické dielektrikum s odpovídajícími okrajovými podmínkami [15].

2.3.1 Základní dělení optických vláken

V závislosti na průměru a indexu lomu jádra, optická vlákna rozdělujeme:

1. Jednomódová optická vlákna
2. Mnohomódová optická vlákna
3. Gradientní optická vlákna [4]
4. Slabě vodivá optická vlákna

2.3.1.1 Jednomódová optická vlákna (SMF)

Obecně jednomódové optické vlákno vede pouze jeden dominantní mód, tvořený dvěma degenerovanými složkami s navzájem ortogonální polarizací [12]. *Jednovidového přenosu lze dosáhnout dvěma způsoby, a to velmi malým průměrem*

jádra, srovnatelným s vlnovou délkou použitého zdroje nebo velmi malým rozdíle indexu lomu jádra a pláště [13].

Obecně se průměr jádra pohybuje okolo 3 -10 μm , průměr obalu okolo 125 μm s NA 0,08 - 0,15 [4, 6].

SMF má malý útlum. Tento typ má zanedbatelnou módovou disperzi. Podmínka, která určuje jednomódový přenos vláken, je vyjádřena vztahem:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA < 2,405 \quad (2.5)$$

Kde 2,405 je hodnota prvního kořenu Besselovské funkce.

U jednomódových vláken je dalším významným parametrem popisujícím přenosové vlastnosti takzvaná mezní vlnová délka $\lambda_{cut-off}$, která souvisí s podmínkou jednomódového přenosu:

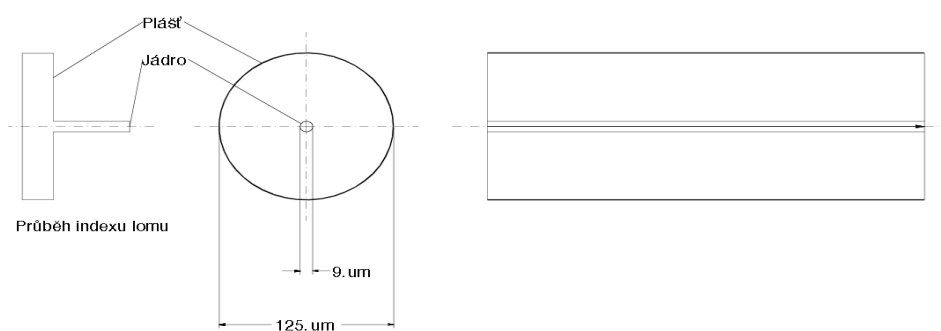
$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}}{2,405} \quad (2.6) [4, 6, 17]$$

n_{co} = index lomu jádra

n_{cl} = index lomu pláště

a = průměr jádra

Aby byla splněna podmínka jednomódového přenosu, musí platit $\lambda > \lambda_c$, pro vícemódový přenos $\lambda < \lambda_c$.



Obr. 4: Jednomódové vlákno [5]

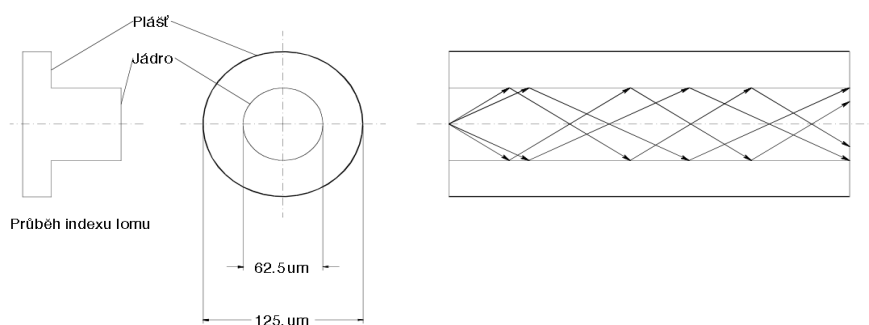
2.3.1.2 Mnohomódová optická vlákna MMF SI

Podstatou mnohamódových optických vláken je rozložení šířícího se pole do mnoha světelných paprsků. Princip MMF SI je znázorněn na (obr. 5). U těchto mnohamódových vláken má výraznější vliv disperze.

Výsledné výstupní pole je ovlivněné různou dobou šíření po různých drahách v jádře vlákna, které má obecně větší průřez, než u jednomódových vláken.

Průřez jádra mnohamódových vláken se pohybuje 50 - 100 μm . Jejich NA 0,3 - 0,6.

Výhodou těchto vláken je vyšší NA a jednodušší technologie výroby [4,6,7].



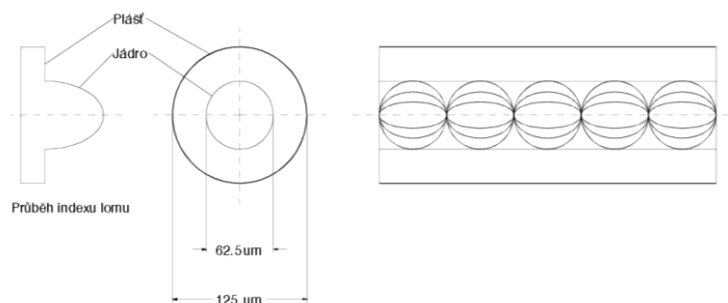
Obr. 5: Mnohamódové optické vlákno [5]

2.3.1.3 Gradientní optické vlákno MMF GI

Tato vlákna se vyznačují plynulou změnou indexu lomu jádra, tedy poklesem indexu lomu směrem od osy jádra.

Na rozdíl od jednomódového a mnohamódového vlákna, které pracuje na totálním odrazu, tento typ vlákna využívá principu ohybu světla (obr. 6). Zde je částečně eliminována módová disperze, proto mohou být použity vyšší přenosové rychlosti.

Gradientní optická vlákna mají průměr jádra 50 - 62,5 μm , NA= 0,18 - 0,24. Jsou využívána v oblasti vlnových délek $\lambda = 850 - 1300 \text{ nm}$ [4,6].



Obr. 6: Gradientní optické vlákno [5]

2.3.1.4 Slabě vodivá vlákna

Slabě vodivá vlákna se vyznačují velmi malým rozdílem indexu lomu jádra a pláště. Platí pro ně, že $\Delta \ll 1$. Kde Δ udává poměr indexů lomu jádra a obalu, vycházející ze vztahu:

$$\Delta \approx \frac{n_{co}}{n_{cl}} \quad (2.7)$$

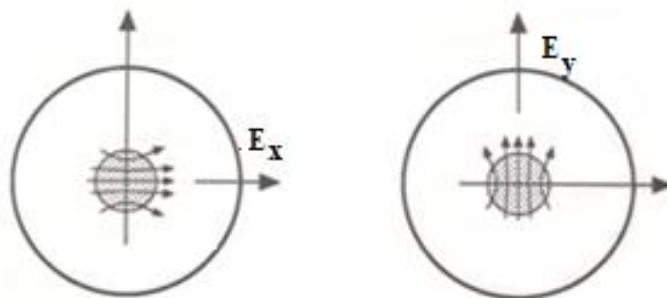
Slabě vodivá vlákna s malým rozdílem indexů lomu jsou náchylná ke ztrátě vlnovodného efektu při ohybech a deformacích. Těchto vlastností se využívá při aplikacích v senzorice.

Se zmenšujícím se rozdílem indexů lomu na rozhraní klesá pevnost vazby šířící se vlny na vlnovodnou strukturu.

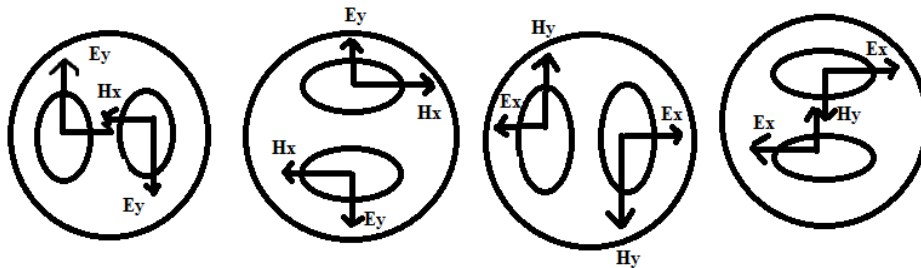
Podle přístupu a potřeb analýzy rozložení elektromagnetického pole v optickém vlákně se využívá různých reprezentací módů. V našem případě využijeme popisu LP módů, které poprvé zavedl v roce 1971 D. Gloge. Jedná se o aproximativní popis šířící se vlny, pomocí lineárně polarizovaného LP módu, který vzniká superpozicí módů s přibližně stejnými podélnými konstantami šíření. Superpozicí módů s téměř stejnými konstantami šíření vznikají módy, které mají pouze jednu kartézskou složku příčné intenzity elektrického pole a jednu složku magnetického pole.

Tento typ módu je vhodný pro popis našeho experimentu, kde jsme pracovali s módy LP_{01} a LP_{11} viz (obr. 30, 31), podle vlnové délky použitého zdroje [19].

Každý mód LP kromě LP_{01} může mít čtyři různé kombinace polarizací [15].



Obrázek 7: Módy LP_{01} [4]



Obr. 8: Módy LP_{11} [4]

2.4 Materiály a výroba

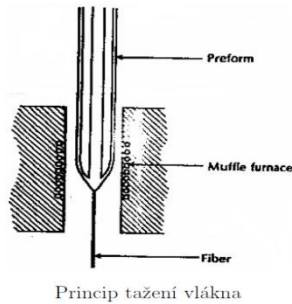
Pro výrobu vláken jsou základním předpokladem dva různé materiály. Tato vlákna musí mít minimální útlum s minimálním rozptylem pro určitou pracovní vlnovou délku. Toho však lze dosáhnout, pokud budou eliminovány nečistoty a bude-li určena limita hraničních podmínek krystalických struktur.

Pro výrobu se užívá ultra čistý prášek skloviny. Nejpoužívanějšími materiály jsou: SiO_2 , GeO_2 , B_2O_2 .

V teplotním rozsahu $900^\circ - 1300^\circ C$ nízkoteplotním tavením vznikne tavenina bez bublin. Při tomto procesu se změní index lomu. Proces tavení probíhá v tavicím kelímku. Aby byly eliminovány nečistoty, k ohřevu se používá takzvaný indukční ohřev. Pomocí vysoušecího plynu dojde k probublávání, a tím se a tím dojde k odstranění OH iontů. Vysoušecí plyn je ve většině případů přehřátý. To způsobí ohřev taveniny. V posledním kroku se sklovina odlévá do tyčí, které nazýváme preformy.

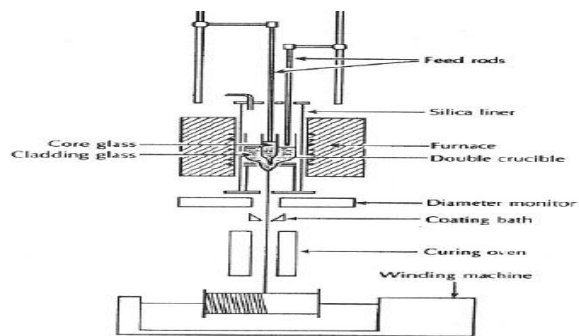
Technologie, která poskytuje nejčistší sklovinu, se nazývá deponitní technologie. Bohužel je energeticky velmi náročná. Tato technologie využívá princip destilace. Skelné páry jsou odpařeny a posléze se usazují na kondenzační destičce.

Avšak existují i dostupnější technologie jako je například tažení vláken klasickou technologií. Tato metoda je levná, ale není možné dosáhnout tak malých útlumů a to proto, že rozhraní mezi jádrem a pláštěm není řízené. Tažnou technologií (obr. 9) se vyrábějí pouze SI vlákna s velkými rozměry. Rychlost tažení je $200-2000$ m/s [4].



Obr. 9: Princip tažení vlákna [5]

Další možností technologií je metoda dvojitého kelímku (obr. 10), která umožňuje vyrábět velmi dlouhá vlákna s gradientním průběhem indexem lomu. Metoda pracuje pomocí dvou kelímků, kde v jednom se nachází jádrový materiál a ve druhém kelímku plášťový materiál. Rozměry vlákna jsou závislé na rychlosti tažení a teploty těsně za hrotem kelímků. Z tohoto důvodu se používá CO_2 laser. Tento laser dokáže velmi rychle reagovat na změny teploty nebo změnu tažné rychlosti.

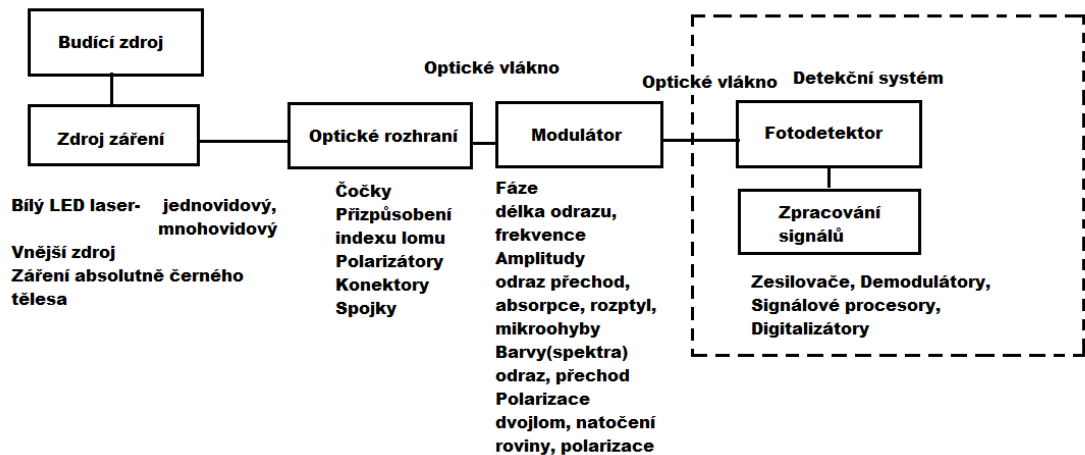


Obr. 10: Metoda dvojitého kelímku [5]

Vlákna lze vyrobit i pomocí technologií jako je OPVO, VAD, MCVD, PCVD [4].

3. Optické vláknové senzory

Optické vláknové senzory je neustále se rozvíjející zařízení, které je v současné době velmi využívané v mnoha oblastech. Slouží k přenosu a zpracování signálů v systémech. Na (obr. 11) lze vidět hlavní konstrukční prvky OVS, které lze podle konstrukce rozdělit na další 3 typy OVS.



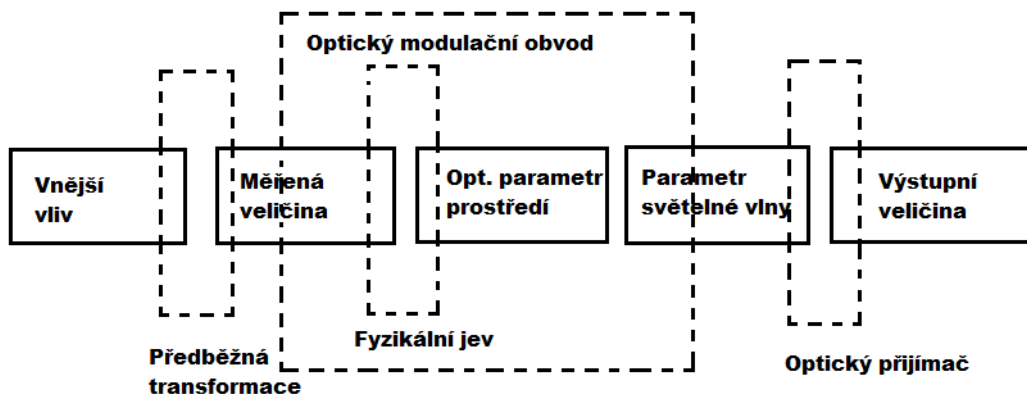
Obr. 11: Hlavní konstrukce Senzorů [6]

Senzory obecně vynikají svou odolností vůči například chemicky-agresivnímu prostředí vysokou citlivostí a svými rozměry. Avšak mají i své nevýhody, kterých se ne vždy podaří zbavit.

Na vstupu OVS se nachází zdroj záření, z něhož světlo vchází do optického vlákna. V optickém vlákne dochází k fyzikálnímu jevu, který působí snímaná veličina. Světlo je přivedeno na detektor, který optický signál změní na elektrický. Pomocí elektronického detekčního systému je dále zpracován elektrický signál [7]. Na (obr. 12) lze vidět, jak probíhá transformace fyzikální proměnné.

Toto zařízení může měřit téměř jakoukoli fyzikální proměnnou jako je například: intenzita elektrického a magnetického pole, teplota, elektrický proud, tlak i síla.

Optické vláknové senzory se rozlišují podle způsobu modulace optického signálu, podle snímané veličiny optického vlákna a optické konstrukce.



Obr. 12: Optické vláknové senzory a transformace fyzikálních veličin [6]

[7]

3.1 Parametry optických vláknových senzorů

Značnou roli v oblasti optických vláknových senzorů hrají tyto parametry:

- Citlivost: Při působení fyzikální veličiny je hodnotou napětí signál nacházející se na výstupu.
- Práh citlivosti: Na výstupu senzoru je hodnota napětí signálu rovna střední kvadratické hodnotě napětí vnitřních šumů. Tento parametr je závislý na vnitřním šumu. Prah citlivosti ovlivňuje šum, který vzniká v optickém vlákne. Šum lze vykompenzovat pomocí diferenciálních metod detekce. Příčinou šumu optického vlákna může být mezividová konverze, nestabilita polarizace optické vlny a jiné.
- Dynamický rozsah: Interval přípustných hodnot měřené veličiny je vyjádřen určitým prahem citlivosti a maximální přípustnou hodnotou snímané veličiny.
- Linearita: Na výstupu senzoru hodnota napětí signálu a hodnoty snímané veličiny představuje lineární závislost [7].

3.2 Rozdělení optických vláknových senzorů

Podle použitého optického vlákna OVS rozdělujeme na:

- Vlastní senzory: V tomto případě optické vlákno pracuje jako citlivý prvek, v němž dochází ke změně intenzity, fáze, frekvence a polarizačního stavu.
- Nevlastní senzory: U nichž vlákno představuje prvek vstupu – výstupu signálu. Modulace se neuskutečňuje ve vlákně.

Podle druhu konstrukce:

Existují 3 typy konstrukcí:

- Vlákno – optická konstrukce: Optické vlákno je citlivý prvek.
- Optická konstrukce: Využívá nevlastní senzory.
- Neoptická konstrukce: Signál prochází skrz optické vlákno, využívá se neoptického fyzikálního jevu [7].

Lze rozlišovat podle typu použitého optického vlákna:

- Jednomódové optické vlákna
- Mnohomódové optické vlákna [7]

V poslední řadě lze klasifikovat dle fyzikální proměnné:

Obecně fyzikální proměnná působí na senzor tím, že mění v jeho optickém vlákně optické vlastnosti. Může to být index lomu n , absorpce a nebo emise (fluorescence) e . Tyto změny popisují optické tenzory. Tenzory vyjadřují vztah mezi změnou parametrů šíření světla v prostoru, kde působí fyzikální proměnná. Fyzikální proměnné jsou: chemické, tepelné, magnetické nebo radiační.

Například měřená fyzikální proměnná tlakem p je způsobí piezoelektrický jev. Tento modulační efekt vzniká ve vlákně [8].

Podle způsobu modulace světla:

- Amplitudová (intenzitní) modulace
- Fázová modulace
- Modulace vlnové délky
- Polarizační modulace
- Frekvenční modulace [7]

3.3 Amplitudová modulace

Amplitudová modulace patří k nejrozšířenějším typům OVS. Tyto senzory využívají amplitudovou modulaci. Jsou to senzory jednoduché konstrukce, pracující s mnohovidovými vlákny. Ve srovnání fázově modulovanými senzory jsou amplitudové senzory méně citlivé [7].

Existují 2 typy:

- Vazební, amplitudové senzory: Měří sílu, která vychyluje vlákno.
- Ztrátové, amplitudové senzory: V závislosti na indexu lomu prostředí je z vlákna odčerpáván výkon. Tento typ lze získat pomocí obnažení jádra nebo ohnutím vlákna.

Amplitudová modulace optického vlákna vzniká z následujících příčin:

- Změnou útlumu: Přímé zeslabení světla je způsobené změnou koeficientu tlumení v optickém prostředí.
- Se změnou indexu lomu: Tato změna je způsobena například indukovaným dvojlomem.
- Porušením okrajových podmínek šíření světla
- Změna vzájemné vazby světlovodů
- Generace záření [7,9]

3.3.1 Senzory se změnou útlumu

Tyto senzory vynikají jednoduchou konstrukcí. Jsou využívány na měření teploty, elektrického napětí a dávek radioaktivního záření. Existují dva přístupy při konstrukci senzorů se změnou tlumení. První skupinou jsou senzory s citlivou částí senzoru, optické vlákno mění koeficient útlumu anebo útlum se v prostředí mění mezi vstupem a výstupem vlákna. Vztah pro koeficient útlumu optického vlákna je:

$$a = p \cdot e^{[-A(T) \cdot (r-a)] \cdot \alpha_d} \quad (3.1)$$

p = poměr celkového výkonu vedeného pláštěm a celkového přenášeného výkonu

$(r - a)$ = tloušťka pláště

a = poloměr jádra

α_d = koeficient tlumení pláště

T = teplota v °C

$A(T)$ = funkce, pro kterou platí experimentální vztah:

$$A(T) = \{1,394 \cdot 10^{12} [(320 - T) \cdot 10^{-5}]^{\frac{3}{2}} - 1,596 \cdot 10^{10} \cdot (320 - T) \cdot 10^{-5}\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.2) [7]$$

3.3.2 Senzory se změnou indexu lomu

Intenzitu světla ve vlákne lze změnit vlastnostmi homogenního optického materiálu a také přerušením optického vlákna a ovlivňováním vazeb mezi jeho konci. Změny lze získat vzájemným pohybem konců vlákna, clonou, anebo pohybem pomocí modulačního indexu. Modulační index je dán vztahem:

$$Q = \frac{\Delta I}{I_0 p} \quad (3.3)$$

ΔI = změna optického výkonu

I_0 = vstupní optický výkon

p = tlak

Tyto senzory patří do skupiny s dobrou linearitou využívající mnohamódové optické vlákna. Pomocí těchto senzorů lze měřit posunutí, sílu tlaku i veličiny, které lze přetransformovat například: teplota, zrychlení a další. Nevýhodou je náročná a neodolná konstrukce [7].

3.3.3 Senzory s porušením okrajových podmínek

V této skupině senzorů vlivem snímané fyzikální veličiny, dochází k porušení okrajových podmínek. Nejčastěji se využívá porušení okrajové podmínky úplného vnitřního odrazu mezi jádrem a pláštěm vlákna.

Podmínka úplného odrazu je dána vztahem:

$$\theta_d \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (3.4)$$

θ_d = úhel dopadu

n_1 = index lomu prostředí, kde se šíří světlo

Senzory s porušením okrajových podmínek vynikají svou kompatibilitostí a citlivostí. Jejich největší výhodou je jednoduchost konstrukce [7].

3.3.4 Senzory s dynamickou vzájemnou vazbou

Vynikají vysokou citlivostí, malými rozměry i hmotností. Bohužel v praxi nenalezly širší uplatnění. Příčinou je poměrně složitá technologie výroby.

K modulaci světla se využívá porušení synchronizace módů s využitím elektrooptického materiálu, z kterého je vyrobený vlnovod nebo podložka. Energie je přenášena z jednoho módu na druhý vytvořením optické vazby v anizotropním materiálu. K vytvoření optické vazby z jednoho jádra do druhého jádra optického vlnovodu se využívá optického tunelového jevu [7].

3.3.5 Senzory s emisí záření

Využívají indukované záření vlivem vnějšího fyzikálního působení. Jejich výhodou je jednoduchá konstrukce, naopak nevýhodou je ohraničenost oblasti použití. Senzory s emisí záření využívá speciálních vláken. Detekují například tepelné záření v místě ohřívaného úseku v optickém vlákne. [7]

3.4 Fázová modulace

Na principu fázové modulace jsou založeny nejcitlivější optické vláknové senzory. Fázová modulace probíhá v optickém vlákne, kudy se šíří světelné vlny. Změny fáze jsou měřeny pomocí interferometrických metod. Díky těmto metodám lze měřit extrémně malé změny dráhy optického signálu. Změna fáze světelné vlny je způsobena vlivem snímané veličiny x , prostřednictvím změny délky, indexu lomu a průřezu optického vlákna. Avšak změna průřezu optického vlákna je zanedbatelná. Změna fáze lze vypočítat ze vztahu:

$$\Delta\Phi = \left(nk \frac{dL}{dx} + kL \frac{dn}{dx} \right) \Delta x \quad (3.5)$$

Významný parametr optických senzorů je citlivost, ta lze vypočítat ze vztahu:

$$S = \frac{\Delta\Phi}{\Delta E} \quad (3.6)$$

$\Delta\Phi$ = změna fáze při změně snímané veličiny ΔE

Změna indexu lomu a také konstrukční rozměry optického vlákna způsobují extrémní citlivost fázových sensorů. Pomocí fázových sensorů lze měřit vícero změn způsobených vnějšími vlivy.

Dle konstrukce lze fázové optické vláknové senzory či optické vláknové interferometry dělit:

- Sensory s Machovým-Zehnderovým interferometrem
- Sensory se Sagnacovým interferometrem
- Sensory s Michelsonovým interferometrem
- Sensory s mezividovým interferometrem
- Sensory s Fabry-Perotovým interferometrem

Optické vláknové interferometry lze roztřídit do tří skupin:

- Dvouramenný jednovidový interferometr: do této skupiny lze zařadit Michelsonův nebo Machův - Zehnderův interferometr. Pracuje na principu porovnání fáze světelné vlny, která se šíří optickým vláknem s vlnou šířící se referenčním optickým vláknem. Nevýhoda těchto interferometrů je složitá optická konstrukce.
- Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou: Jedná se o porovnání fází obou světelných vln jdoucích proti sobě v cílce. Patří zde Sagnacův interferometr.
- Mezimódový interferometr: U šířících se módů v optickém vlákně využívá efektu interference mezi módy [7].

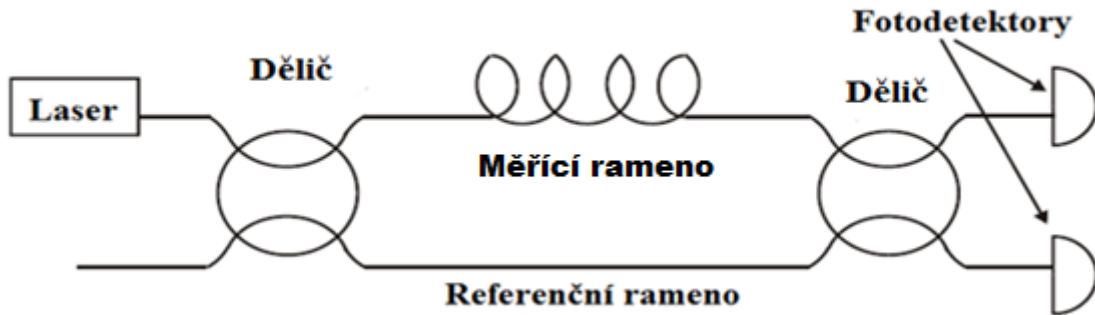
3.4.1 Sensory s Machovým - Zehnderovým interferometrem

V současnosti nejvíce využívaným fázovým optickým vláknovým senzorem je Machův - Zehnderův interferometr (obr. 13).

Tyto senzory jsou velmi citlivé na změnu fyzikální veličiny. Lze s nimi měřit například akustický signál, tlak, teplotu intenzitu, množství radioaktivního záření, elektrický proud či magnetické pole.

Citlivost těchto senzorů zvyšuje pokrytí optických vláken. Vlákná se například pokrývají plastem. Pokrytí optických vláken potlačují různé vlivy fyzikálních veličin.

Vlivem působení záření na index lomu nastává fázová modulace optického signálu ve vlákně senzoru. Tyto senzory využívají zdroje světla s malou koherenční délkou [7].



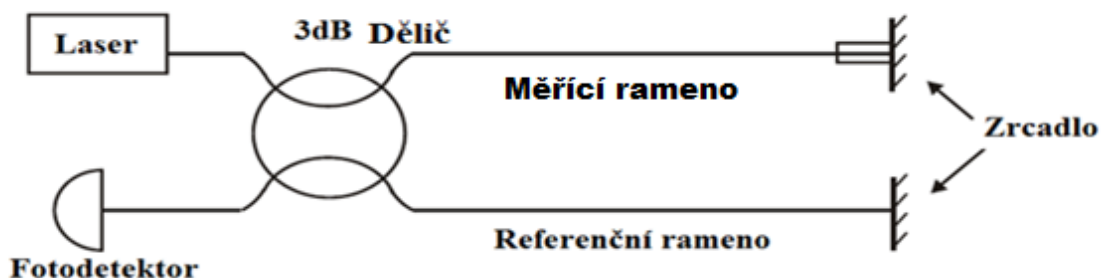
Obr. 13: Machův- Zehnderův interferometr [7]

3.4.2 Senzory s Michelsonovým interferometrem

Je to fázový senzor s Michelsonovým optickým vláknovým interferometrem měřící fázový posun mezi optickým signálem, který se šíří senzorem a v referenčním optickém vlákně. Konstrukce senzoru je jednoramenná [7]. Tento interferometr je složen ze zdroje, polopropustného zrcátka, detektoru a dvou odrazných zrcadel

(obr. 14). Pokud se změní poloha předmětu podle počtu interferenčních proužků, lze určit vzdálenost násobkem půlvlnných destiček. Koherenční délka poté určuje maximální rozdíl, mezi měřícím (senzorové) a referenčním ramenem, mezi délkou dráhy v referenčním a měřícím rameni. Je dána vztahem:

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.7)$$



Obr. 14: Michelsonův interferometr [7]

[14]

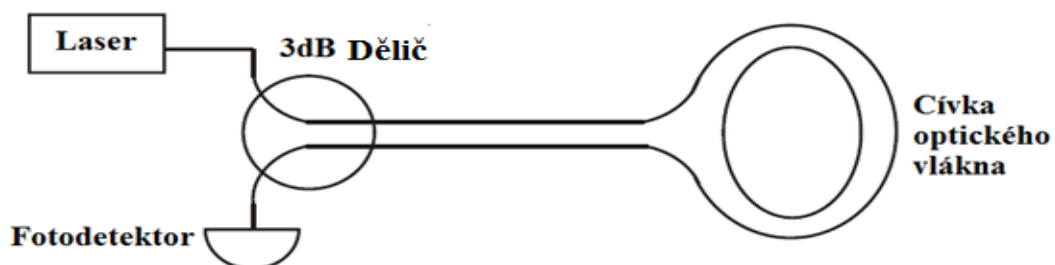
Tento interferometr lze využít tam, kde i Machův - Zehnderův interferometr. Fyzikální veličiny způsobují změnu odrazových vlastností konce optického vlákna. Lze s ním měřit rychlost pohybu externího zrcadla, malé posuny a vzdálenosti s dělením amplitudy. Díky Dopplerovu jevu je možné změřit rychlost pohybujících se částic například agresivních plynů a kapalin na hůře dostupných místech, třeba i průtoku krve v žilách. U tohoto typu konstrukce lze užít mnohamódového optického vlákna.

3.4.3 Senzor se Sagnackovým interferometrem

Podstatou tohoto interferometru je princip Sagnackova jevu. To znamená, že dvě protisměrně šířící se elektromagnetické vlny projdou tuto dráhu za různý čas. Rotující cívka optického vlákna, prochází protisměrně se šířící dvě elektromagnetické vlny. Jedna vlna se šíří po směru otáčení a druhá v protisměru. Na výstupu se navzájem liší posuvem fáze, v důsledku rotace cívky. Ve výsledku se v interferenčním obrazci zobrazí posuv fáze jako pohyb maxim a minim.

Sagnackovým interferometrem (obr. 15) lze měřit úhlovou rychlost a polohu, nebo jej je možné použít k měření intenzity magnetického pole a elektrického proudu.

Výhoda těchto senzorů spočívá v jejich velké citlivosti [7].



Obr. 15: Sagnackův interferometr [7]

3.4.4 Senzor s módovým interferometrem

Senzory s mezimódovým interferometrem mohou být konstruovány s jednoramenným, dvouvidovým nebo vícevidovým interferometrem, v jejichž konstrukci jsou využívána mnohovidová optická vlákna. Na fázi různých vidů působí rozdílně snímaná fyzikální veličina.

Výhodou jsou interferující módy, které se šíří ve stejném prostředí, na něž působí stejné vlivy a jejich jednoduchá konstrukce. Je-li vnější vliv na vidy různý, potom se výstupní signál mění.

Tyto senzory měří akustické signály, magnetické pole a elektrický proud [7].

3.4.5 Senzory s Fabry - Perotovým interferometrem

Senzory s Fabry - Perotovými interferometry jsou zařízení umožňující bodově měřit různé fyzikální veličiny na těžko dostupných místech.

Jejich jednoduchá konstrukce při detekci signálů dovoluje dosahovat vysoké citlivosti a kompaktnosti. Avšak technologie výroby rezonátoru je velmi náročný.

Konstrukce Fabry - Perotova rezonátoru je možné vidět na (obr. 16).

Fabry - Perotův interferometr dovoluje snímat stejné veličiny, tak jako předchozí fázové senzory, ale neumožňuje snímat jedinou veličinu, což je úhlová rychlost.

Postupná a odražená elektromagnetická vlna má maximální přenos a fázový posun, pokud splňuje podmínku, která je určena vztahem:

$$\Phi = \frac{2nL}{\lambda} 2\pi \quad (3.8)$$

L = délka rezonátoru

n = index lomu

λ = vlnová délka

Vztah pro změnu fáze platí vztah:

$$d\Phi = \frac{4\pi(nL)}{\lambda^2} \cdot d\lambda \quad (3.9) [7]$$



Obr. 16 : Konstrukce senzoru s Fabry - Perotovým rezonátorem [6]

3.5 Polarizační optické vláknové senzory

Polarizace optického signálu, který je přenášen optickým vláknem slibuje mnoho konstrukčních možností s různou citlivostí.

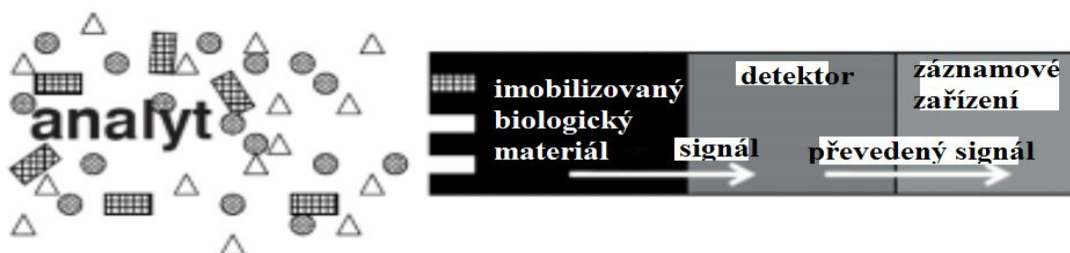
Ke konstrukci těchto senzorů lze přistupovat různě. Mohou být využívána optická vlákna s velkým nebo malým dvojlomem. U polarizačních senzorů je vlákno citlivým prvkem.

Fyzikální jevy, které tyto senzory využívají, jsou například:

- Faradyův magnetooptický jev (magnetické pole způsobuje otáčení roviny polarizace)
- Elektrogyrační jev (Jev je způsobem v některých krystalech elektrickým polem)
- Kerrův jev (Ve vhodném umístění v el. poli s vhodným šířením světla v izotropním prostředí dochází ke vzniku tohoto jevu)
- Pockelsův jev (Příčinou vzniku jevu je linearita intenzity el. pole, může docházet i v některých krystalických materiálech)
- Fotoelastický jev (V některých materiálech při deformaci může dojít k dvojlomu) [7].

3.6 Biosenzory s optickými vlákny

Biosenzory jsou zařízení, která detekují stopy biologických látek, případně mikroorganismů. Chemické nebo biofyzikální signály jsou následně převedeny na optickou a elektronickou informaci. Jsou rovněž schopné monitorovat biologické a chemické reakce v reálném čase. Skládají se ze dvou částí a to biosenzoru a převodníku [17]. Schéma biosenzoru lze vidět na (obr. 17) [16].



Obr. 17: Schéma biosenzoru [8]

Bioreceptory jsou tvořeny molekulami, které jsou schopné rozpoznat analytický cíl. Avšak informace je možno zprostředkovat až v převodníku. Lze je použít v celé řadě aplikací jako například: detektor plynů, měřiče vlhkosti a další [17].

Optické biosenzory podle konstrukce se dělí na senzory: biosenzory s vláknovou optikou, integrované planární vlnodivé senzory, biosenzory s evanescentní vlnou a interferometrické biosenzory.

Optické interferometrické vláknové či případně integrované senzory tvoří významnou skupinu biosenzorů. Interferometrické biosenzory využívají převážně konfigurace vlnodivného (kanálového) Mach - Zehnderova interferometru a Fabry - Perotova interferometru.

Optické biosenzory mají za úkol rozeznat molekuly a ty následně způsobí optickou změnu jako například: absorpci, luminiscenci, anebo také změnu indexu lomu [17]. Aby bylo možné zkonstruovat optický biosenzor, je nutné imobilizovat biologický materiál do pevného, bezhybného stavu a to i v detekčním zařízení. Lze použít jakýkoliv biologický materiál (bílkoviny, enzymy, mikroorganismy, nukleové kyseliny - DNA, RNA,...). Dle povahy biologického materiálu vzniklý signál závisí na detekčním zařízení [16].

Biosenzory musí splňovat tato kritéria: dostatečná selektivita, stabilita při opakovaném použití, samozřejmostí je i biokompatibilita. Všechna kritéria optické vláknové biosenzory obecně nesplňují [16].

Tato zařízení se uplatňují v medicíně, toxikologii, diagnostice a při biotechnologických procesech.

V budoucnu by mohly být biosenzory využívány v oblasti nanotechnologií jako nanosenzory s biologickým základem, dále jako robot, který bude sledovat a regulovat vylučování inzulínu nebo robot, který je schopen rozpoznat a zničit rakovinou tvorné buňky od zdravé buňky [16].

Optické biosenzory lze dělit z mnoha hledisek. Optické biosenzory rozdělené dle rozdělení jevů [17].

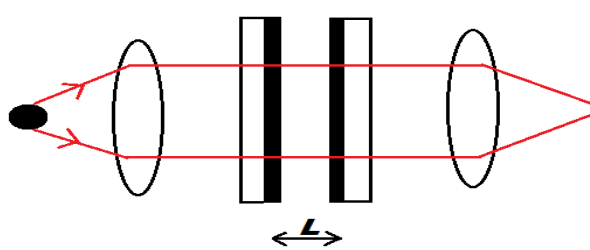
Význačnými veličinami optického biosenzoru jsou:

- Pokrytí povrchu r : Určuje množství absorbovaného materiálu na povrchu.
- Citlivost: Hmotnost detekované látky, která vyvolává signál na plochu citlivého povrchu.
- Detekční limit: Představuje minimální koncentrace látky, kterou lze detekovat [17].

4. Senzor s Fabry Perotovým interferometrem - experimentální ověření

Fabry - Perotův interferometr je zařízení, které bylo vyvinuto Ch. Fabrym a A. Perotem v roce 1899. Představuje zlepšení Michelsonova interferometru a jeho interferenčních metod. Reálnou sestavu tohoto senzoru je možné vidět na (obr. 19).

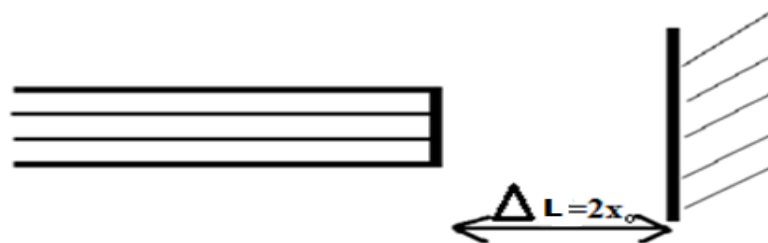
Obecná konstrukce senzoru s Fabry – Perotovým rezonátorem je vidět na (obr. 18). Je složený ze dvou paralelních, vzájemně pohyblivých zrcadel, od sebe vzdálených o vzdálenost L . Dále se obecně skládá z optiky a clonky s otvorem, na kterém lze pozorovat maxima a minima interferenčních proužků, jejichž pohyb závisí na změně vzdálenosti L obou zrcadel.



Obr. 18: Obecné schéma - Fabry - Perotův rezonátor [9]

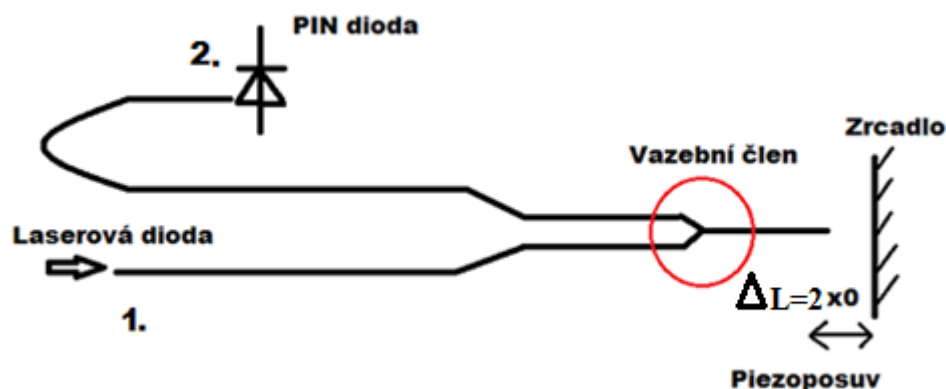
V tomto případě je Fabry - Perotův rezonátor tvořen čelem vlákna, což představuje jedno zrcadlo rezonátoru a druhou stranu rezonátoru tvoří externí posuvné zrcátko (obr. 19).

Konstrukce Fabry – Perotova rezonátoru se nachází na (obr. 26, 27). V prostoru tohoto rezonátoru vznikají stojaté rezonanční vlny, které lze pozorovat na výstupu 2. vláknového vazebního členu na (obr. 19, 28) [18].



Obr. 19: Čelo vlákna a čelo externího zrcadla – Fabry - Perotův rezonátor [10]

Na (obr. 20) je celé uspořádání konstrukce optického vláknového senzoru s externím Fabry - Perotovým rezonátorem [18].



Obr. 20: Konstrukce Fabry - Perotova interferometru [11]

Úkolem bylo experimentálně ověřit princip tohoto optického, vláknového systému.

Záření laserové diody je navázáno do optického vlákna, šíří se skrze vazební část děliče (obr. 29), vstupuje skrze zakončení vlákna a následně se odráží od externího zrcadla. Poté dojde ke zpětnému navázání do jádra optického vlákna a vedené záření opět prochází vazebním členem a poté vystupuje na fotodetektor.

Na fotodetektor necháme dopadat vystupující módy z optického vlákna, a sice módy LP_{01} (obr. 30), v případě 635 nm . A módy LP_{11} (obr. 31) v případě 447 nm . Použili jsme Wollastonův hranol pro odseparování druhého polarizačního stavu módu. Fotoelektrický proud pozorujeme na obrazovce osciloskopu (obr. 33, 34) [18].

4.1 Analýza a výsledky měření experimentu

Na výstupu interferometru obecně naměříme intenzitu I , která je výsledkem interference svazků o I_1 a I_2 . Její hodnotu zobrazujeme prostřednictvím fotoelektrického proudu, na obrazovce osciloskopu (obr. 33, 34).

Hodnota je dána výslednou interferencí odražené vlny od konce vlákna I_1 a od externího zrcadla I_2 .

Výsledná intenzita je dána vztahem:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\varphi_{12} \quad (4.1) [18]$$

φ_{12} = fázové posunutí interagujících svazků

S postupným zvětšováním vzdáleností x_0 se periodicky mění velikost detekované intenzity. Přičemž si označíme dvojnásobnou hodnotu $2x_0 = \Delta L$, což je výsledný dráhový rozdíl.

Dále víme, že:

$$\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 - 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (4.2)$$

φ_1, φ_2 = jsou počáteční fáze svazků

ΔL = dráhový posuv svazků

Výsledná intenzita je:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \varphi_0\right) \quad (4.3)$$

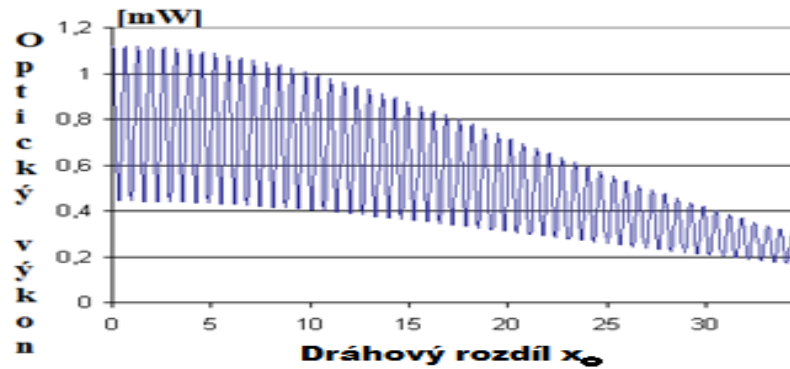
φ_0 = počáteční fázový posuv

λ = vlnová délka zdroje

Fázový posuv:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \quad (4.4)[18]$$

Předpokládaný výsledek změny I_0/I v závislosti na zvětšení vzdálenosti x_0 , je možné vidět na (obr. 21).



Obr. 21: Změna fotoelektrického proudu se změnou vzdálenosti x_0 [12]

[18]

Výsledný průběh intenzity I , se zahrnutím odrazivosti R_1 a R_2 je možné vyjádřit:

$$I = I_0 \left\{ R_1 + (1 - R_1)^2 R + 2(1 - R_1) \sqrt{R R_1} \cos \left(4\pi \frac{x_0}{\lambda} \right) \right\} \quad (4.5)$$

I_0 = intenzita zdroje - laserového záření diody

$$I_1 = I_0 R_1$$

$$I_2 = (1 - R_1)^2 R_2 I_0$$

R_1 a R_2 = příslušné odrazivosti od konce vlákna a externího zrcadla

Tento obecný vztah je možné po úvaze, že I_1 a I_2 mají konstantní hodnotu, lze ji zjednodušit na:

$$I \approx \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \varphi_0 \right) \quad (4.6)$$

Pro zjednodušený popis rezonanční dutiny uvažujme:

$$x_0 = \frac{k\lambda}{2}, \quad \varphi_0 = 0 \quad (4.7)$$

$$\text{Pro } I_{max}: \quad \Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} x_0 = 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.8)$$

$$I_{max} = (\sqrt{I_0 R_1} + \sqrt{(1 - R_1)^2 R_2 I_0})^2 \quad (4.9)$$

$$x_0 = \left(\frac{\lambda}{4}\right) (2k + 1) \quad (4.11)$$

$$\text{Pro } I_{min}: \Delta \varphi = (2k+1) \pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.12)$$

$$I_{min} = (\sqrt{I_0 R_1} - \sqrt{(1 - R_1)^2 R_2 I_0})^2 \quad (4.13)$$

[18]

Z této analýzy vývoje změn intenzity naměřené na výstupu senzoru vyplývá, že každá změna délky rezonátoru x_0 o vzdálenost úměrnou $\frac{\lambda}{4}$, koresponduje se změnou od maximální do minimální hodnoty.

V našem případě jsme během reálného měření se zdrojem záření o $\lambda = 635 \text{ nm}$ ověřili, že při každé změně vzdálenosti x_0 o deset kroků pikoposuvu (1 krok $\sim 30 \text{ nm}$), což odpovídá vzdálenosti $\frac{\lambda}{2}$ prošla změna naměřené intenzity od minima k minimu.

Přechod od minima k maximu souvisí s posuvem pěti kroků.

Pro výsledné vyhodnocení měření je nutné akceptovat, že námi používaný pikoposuv měl přesnost jednotlivého kroku, určenou s přesností $\pm 5 \text{ nm}$.

Podobné omezení v přesnosti měření nás limitovala i při vyhodnocení a porovnání koherenční délky obou dvou zdrojů záření.

Během experimentu jsme ověřili změnu intenzity záření I v závislosti na vzdálenosti zrcadla od čela vlákna (obr. 19).

Z teorie vyplývá, že čím větší vzdálenost je mezi zrcadlem a vláknem, tím intenzita záření klesá. Jakmile se dostaneme do rovnosti dráhového rozdílu s koherenční délkou, tedy do: $\Delta L = l_c$, potom hodnota naměřené intenzity prochází nulou na ose. (obr. 22).

Tuto závislost jsme ověřili pro oba dva použité zdroje koherentního záření. Souvislost poklesu intenzity s posuvem $\Delta L = l_c$, analyzujeme v následující kapitole [18].

4.2 Souvislosti s koherenčními vlastnostmi zdrojů

Výsledná intenzita záření závisí tedy na vzdálenosti x_0 čela vlákna od externího zrcadla. Tato závislost se vyjadřuje ze vztahu:

$$I = 2I_0(1 + \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \varphi_0\right)) \quad (4.14) [18]$$

φ_0 = počáteční fázový posuv

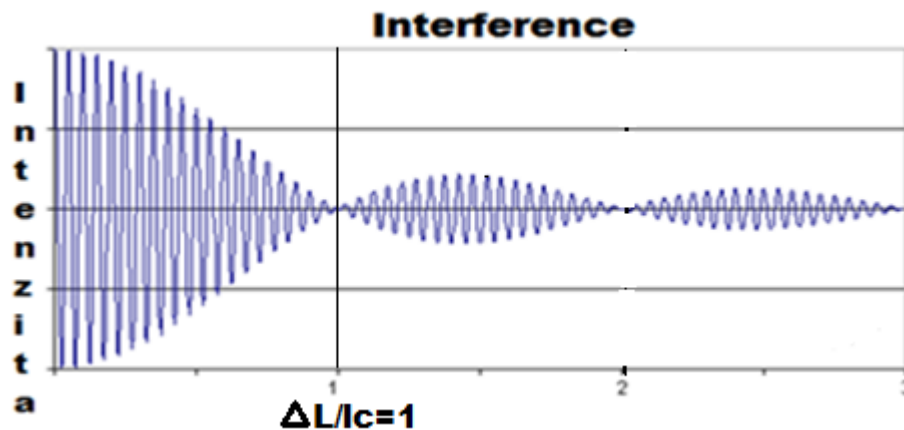
Zdroj záření není nikdy plně monochromatický, to také znamená, že z šířky spektra $\Delta\lambda$ je možné určit koherenční délku l_c laserové diody. Koherenční délka zdroje je dána vztahem:

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (4.15) [18]$$

Viditelnost interferenčních maxim a minim je možné pozorovat na osciloskopu zobrazeným, jako průběh fotoelektrického proudu.

Výsledná viditelnost maxim a minim tedy souvisí také se spektrální šířkou $\Delta\lambda$ zdroje záření a koherenční délkou l_c zdroje laserové diody.

O čím větší vzdálenost se posune externí zrcadlo od čela vlákna, tím více se snižuje výsledná viditelnost interference. Pokud dráhový rozdíl způsobený posuvem zrcadla dosahuje hodnoty koherenční délky, pak v tomto případě výsledná intenzita klesá na nulu.



Obr. 22: Grafické znázornění závislosti viditelnosti interference v souvislosti s koherenční délkou a posunem $\Delta L = 2x_0$ [12]

[18]

Aby bylo možné dostat jednoznačnější průběh výsledného fotoelektrického proudu na osciloskopu, byl za výstup vlákna před detekční PIN diodu zařazen Wollastonův hranol, kterým byl odseparován druhý polarizační stav módu LP_{01} pro $\lambda = 635 \text{ nm}$ (obr. 30). Podobně byla odseparována polovina módu LP_{11} pro $\lambda = 447 \text{ nm}$ (obr. 31). Výsledkem byl jednoznačnější průběh fotoelektrického proudu na obrazovce osciloskopu.

Pro senzorická měření by se dala také použít dvojice PIN diod a snímat za Wollastonovým hranolem oba polarizační stavy, například módu LP_{01} a vyhodnocovat fázový rozdíl při vybraných aplikacích.

Tato metoda se využívá při detekci indukovaných změn polarizačních vlastností optických vláken. Podobně také při rezonanční metodě měření Faradayova jevu optických vláken.

Změna kontrastu interference (obr. 22) dvou optických vln se stejnou intenzitou se mění při posuvu externího zrcátka ΔL v závislosti na koherenční délky l_c zdroje.

Naměřený průběh změny fotoelektrického proudu se zvětšováním vzdáleností x_0 je zobrazen na obrázku (obr. 22). Tento výsledek je možné vyjádřit vztahem (4.14), jak je uvedeno v literatuře [18].

Analýza naměřených hodnot průběhu fotoelektrického proudu při překročení vzdálenosti x_0 , která je větší jak l_c , by zřejmě vyžadovala podrobnější studium problematiky. Ve výsledných naměřených hodnotách se projevují dva efekty a sice vlastní rezonance Fabry - Perotova rezonátoru a její postupné přeladování (se změnou x_0) a výsledná interference optických vln v optickém vláknovém děliči (coupleru).

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \frac{\sin \xi}{\xi} \cdot \cos\left(\frac{2l_c}{\lambda} \xi\right) \right\}, \quad \xi = \pi \cdot \frac{\Delta L}{l_c} \quad (4.16)$$

I_0 - intenzita zdroje světla

λ – vlnová délka záření světla [18]

Ideální 100% viditelnosti interferujících vln nelze dosáhnout. Poněvadž intenzita svazku paprsku odraženého od čela optického vlákna nemůže dosahovat intenzity odražené vlny od čelního externího zrcátka. Od čela vlákna je odraznost přibližně $R_0 \approx 0,04$ a od externího zrcadla přibližně $R_1 \approx 0,99$, pokud uvažujeme, že 100% - ní odraznost je rovna 1.

100% viditelnosti není možné dosahovat ani při nulovém dráhovém rozdílu interferujících vln, kdy externí zrcátko má nulovou vzdálenost od čela vlákna [18].

Pro realizaci a ověření optického vláknového senzoru je důležitým parametrem závislost kontrastu při vzdálenosti: $\Delta L = l_c$, kdy dochází k nulové viditelnosti.

Při dalším posuvu externího zrcátka dochází k pozvolnému růstu hodnot interferenčních maxim a minim až po další pokles na nulovou hodnotu, ke kterému dochází periodicky při posuvu o vzdálenost $\Delta L = l_c$ (obr. 22).

Tato závislost poklesu viditelnosti na vzdálenosti $\Delta L = l_c$, byla ověřena pro dva rozdílné zdroje koherentního záření. A sice pro laser o $\lambda = 635 \text{ nm}$ a laser s $\lambda = 447 \text{ nm}$.

Byly vybrány záměrně dva odlišné konkrétní zdroje záření. Laserová dioda s vlnovou délkou $\lambda = 635 \text{ nm}$ má plnou šířku $\Delta\lambda \approx 10 \text{ nm}$ a odpovídající koherenční délku $l_c \approx 40 \text{ }\mu\text{m}$. Druhá laserová dioda o vlnové délce $\lambda = 447 \text{ nm}$ a $\Delta\lambda \approx 20 \text{ nm}$, a tedy odpovídající koherenční délku $l_c \approx 10 \text{ }\mu\text{m}$.

Výsledky naměřené při experimentu plně odpovídají základní teorii interferometrického optického vláknového systému.

Oba použité laserové zdroje se liší vlnovou délkou λ a šířkou spektra $\Delta\lambda$. Odlišnost šířky spektra $\Delta\lambda$ pro dvě vlnové délky λ a odlišné koherenční délky l_c plně korespondovaly s naměřenou vzdáleností ΔL , při které došlo k poklesu viditelnosti na nulu. Vliv počtu podélných módů N a odstup $\delta\lambda$ mezi jednotlivými módy nebyl uvažován z důvodu nedostatku informací technických parametrů laseru.

K jakostnímu měření posuvu externího zrcátka a odečtu pozice zrcadla bylo použito pikometrického posuvu s elementárním krokem $\leq 30 \pm 5 \text{ nm}$.

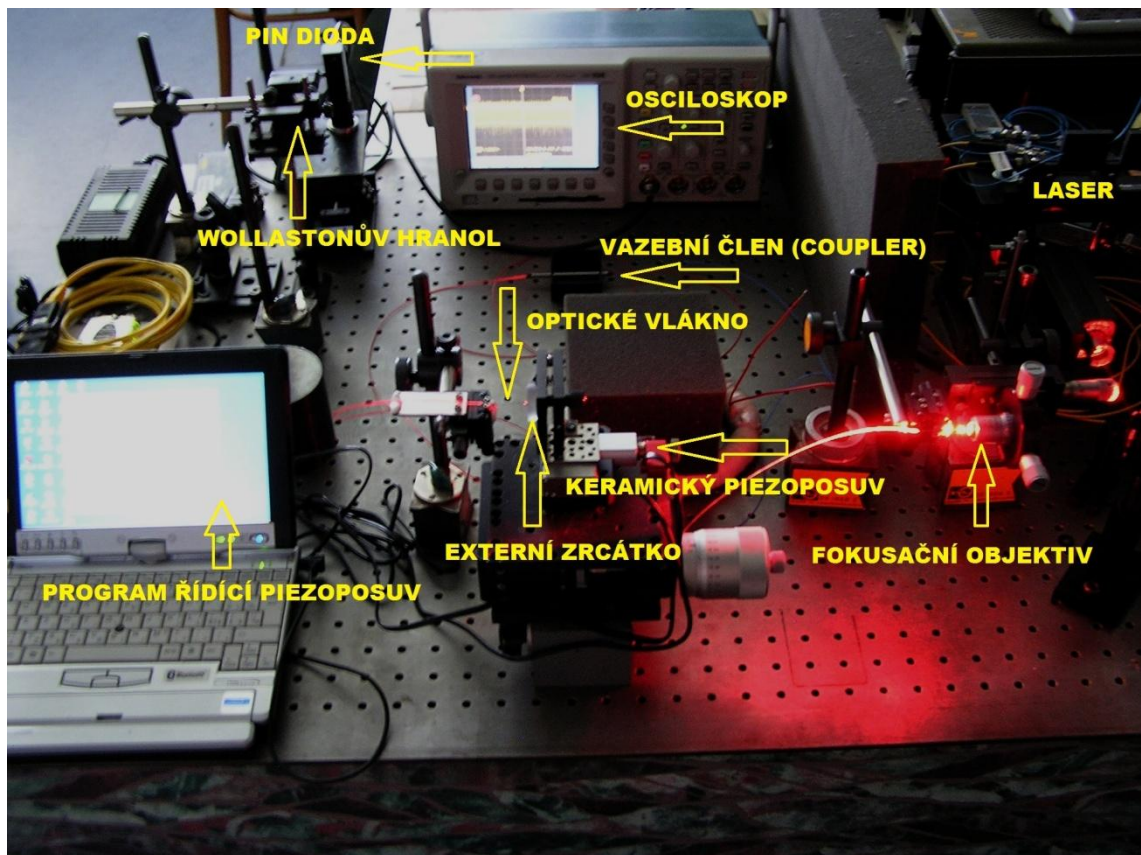
Tento posuv byl řízen pomocí programu *PicoMotor_Closed Loop PicoMotor Driver*. V tomto programu je možné například zadávat počet kroků a nastavit rychlost posuvu.

Během měření při posuvu externího zrcadla docházelo se zvětšováním vzdálenosti, periodicky k poklesu fotoelektrického proudu na minimum, přičemž vzdálenost, kterou urazilo externí zrcadlo, byla plně v korespondenci s koherenční délkou l_c .

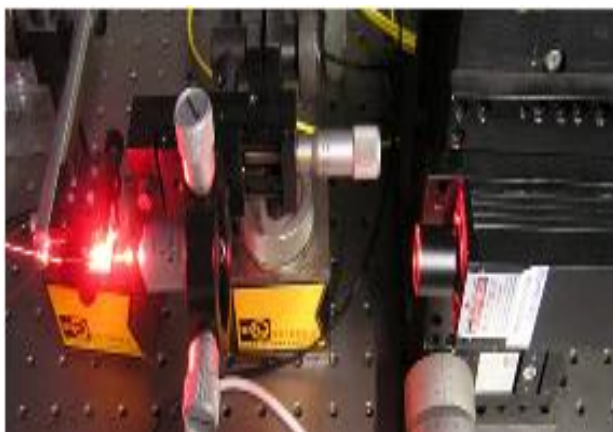
Hodnota fotoelektrického proudu zobrazeného na osciloskopu při poklesu na minimum, však nikdy nedosahovala nulové hodnoty - tím se výsledky měření lišily od teoretického předpokladu.

Podrobnější analýzou experimentu se ukázalo, že námi používaný vazební člen *F- CPL-S12635* (obr. 29) vykazoval velkou odraznost ve vazební části a vysoká hodnota reflektovaného záření ve vazební části na detektoru na výstupu 2. z (obr. 20) zachovávala svou hodnotu trvale i po odstranění externího zrcadla. Tato hodnota byla vyhodnocena jako stálá stejnosměrná složka, kterou je nutno odečíst při výsledném měření. Pro přesnější měření a vybrané aplikace by bylo vhodné použít jiný typ vazebního členu, z důvodu nižší odraznosti ve vazební části. Tato vlastnost nebývá vždy uváděná jako součást katalogových údajů.

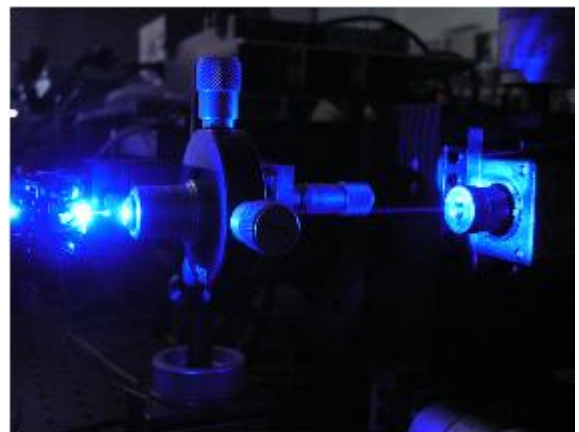
4.3 Dokumentace experimentálního měření



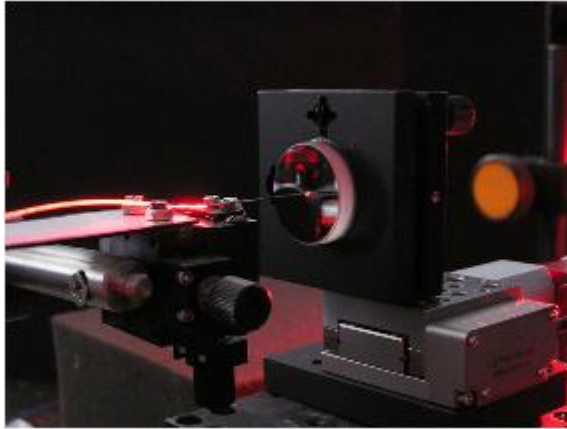
Obr. 23: Sestava vláknového Fabry - Perotova interferometru [13]



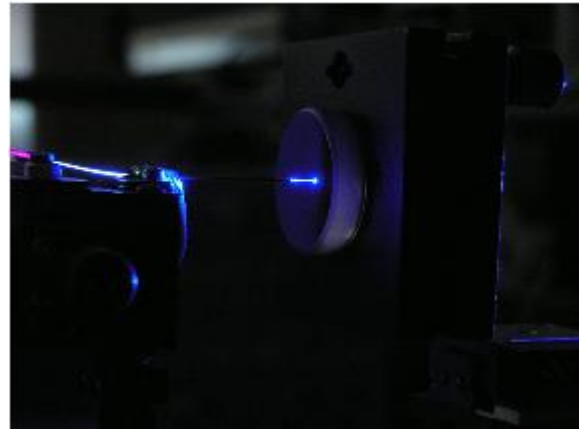
Obr. 24: Fokusační objektiv a laser (635 nm) [14]



Obr. 25: Fokusační objektiv a laser (447 nm) [15]



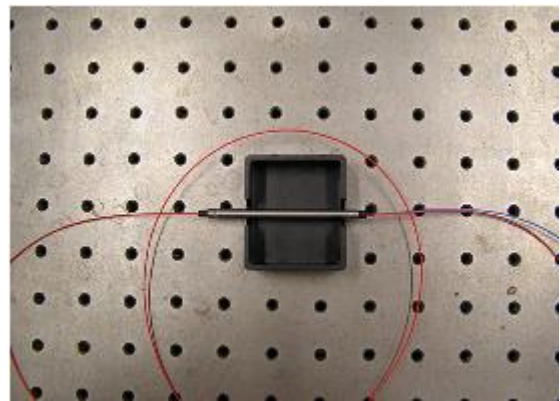
Obr. 26: Externí zrcátko a optické vlákno - Fabry- Perotův interferometr [16]



Obr. 27: Fabry- Perotův rezonátor [17]



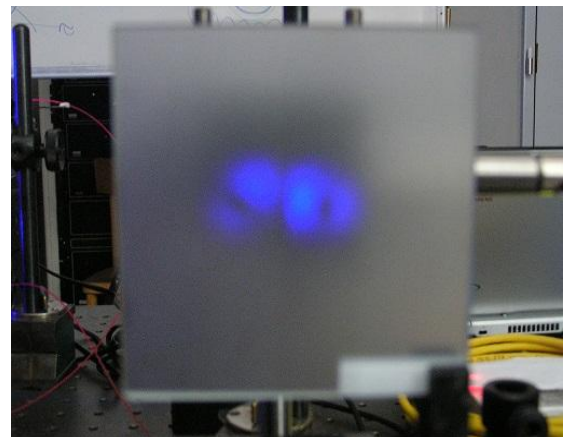
Obr. 28: Wollastonův hranol a PIN dioda[18]



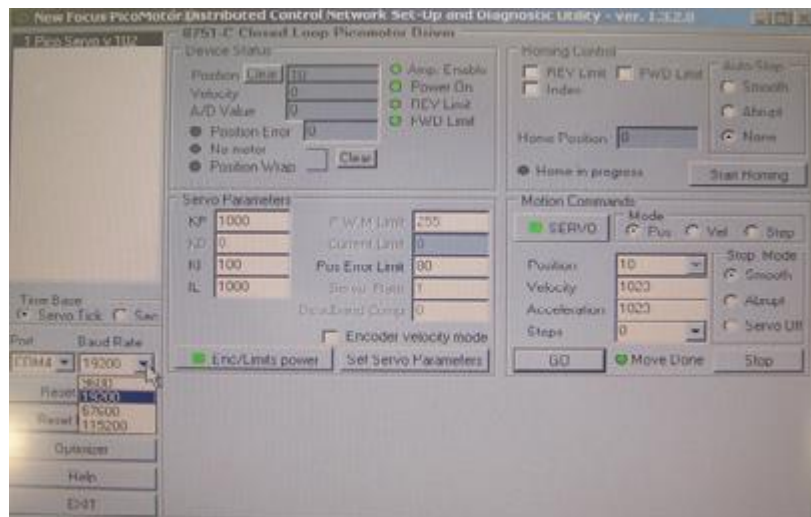
Obr. 29: Vazební člen F- CPL-S12635 (coupler) [19]



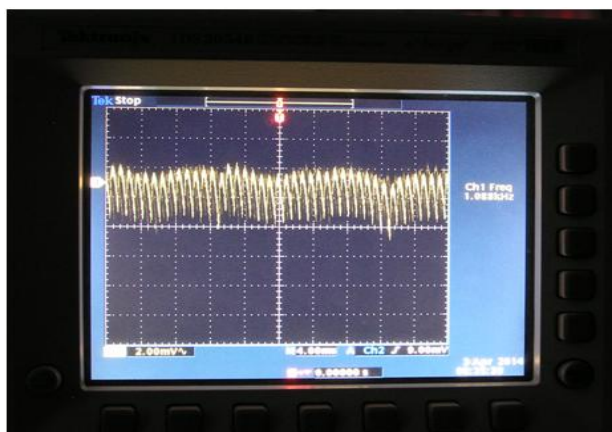
Obr. 30: Výstupní módy LP₀₁ za Wollastonovým polarizátorem [20]



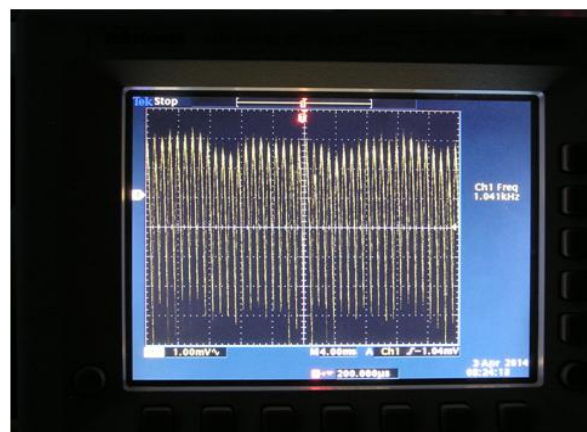
Obr. 31: Výstupní módy LP₁₁ za Wollastonovým polarizátorem [21]



Obr. 32: Program řídící pikometrický posuv [22]



Obr. 33: Naměřený průběh fotoelektrického proudu při posuvu externího zrcátka – minimální hodnota při $\Delta L = l_c$ [23]



Obr. 34: Naměřený průběh fotoelektrického proudu při posuvu externího zrcátka – maximální hodnota při $\Delta L = \min$ [24]

5. Závěr

V úvodu této práce je vytvořen přehled základních typů optických vláken. Jsou rozebrány jejich parametry, jejich rozdělení a krátké shrnutí, jakým způsobem se mohou vlákna vyrábět.

V následující kapitole se nachází rozdělení senzorů podle typů, jejich využití, parametrů, principů a modulace záření.

V této práci lze také nalézt samostatnou kapitolu o biosenzorech, která nám umožňuje vytvořit si širší představu o uplatnění senzorů, u nichž se využívá úzce souvisejících konfigurací, jako je Mach - Zehnderův nebo Fabry - Perotův interferometr.

Pozornost byla věnována především fázově citlivým senzorům s následnou realizací konstrukce optického vláknového senzoru s externím Fabry - Perotovým rezonátorem.

Senzor s Fabry - Perotovým interferometrem byl zrealizován v laboratoři, kde jsme měřili a ověřili základní zákonitosti tohoto optického vláknového senzoru pro dvě záření odlišných vlnových a koherenčních délek. Měření byla provedena pro konkrétní vlnové délky laserových diod $\lambda = 635 \text{ nm}$ a $\lambda = 447 \text{ nm}$. Byly vybrány laserové diody s velmi krátkou koherenční délkou.

Analyzovali jsme vliv koherenčních vlastností záření vybraných zdrojů v souvislosti se změnou viditelnosti interference a periodického opakování minim při posuvu externího zrcadla pro dva odlišné zdroje záření.

Přesnost měření byla limitována nezaručenou přesností minimálního kroku pikoposuvu, jehož velikost se blíží $30 \pm 5 \text{ nm}$. Při opakovaném měření, se výsledky lišily v mezích, danou touto neurčitostí.

Smyslem nebylo provést absolutně přesné měření, ale ověřit princip a aplikační možnosti takového senzoru. Na výstupu senzoru s Fabry – Perotovým interferometrem pozorujeme průběh změn výsledného fotoelektrického proudu, které jsou důsledkem interference dvou svazků o intenzitě I_1 , tedy odraženého od konce vlákna a I_2 odraženého od externího zrcadla. Hodnotu, výsledné intenzity zobrazujeme na osciloskopu, jako průběh detekovaného fotoelektrického proudu na detekční PIN diodě.

Rezonátor je tvořen čelem vlákna a externím zrcadlem. Se změnou vzdálenosti externího zrcátka od čela vlákna, tedy o $x_0 = \Delta L/2$, docházelo ke změně naměřené výsledné hodnoty fotoelektrického proudu, který postupně klesá a prochází minimy.

Detekce minim souvisely s parametry zdrojů záření laserových diod, s koherenční délkou l_c a šířkou spektra $\Delta\lambda$. Pro citlivější senzor je tedy vhodnější použít laserovou diodu s kratší koherenční délkou. Jedná se o laserovou diodu o vlnové délce $\lambda = 447 \text{ nm}$, o koherenční délce $l_c \approx 10 \text{ }\mu\text{m}$. V tomto případě má průběh změny velikosti detekovaného fotoelektrického proudu strmější spád k nulové hodnotě.

Současně je nutné brát v úvahu, že se zvětšující se vzdálenosti x_0 klesá schopnost navázat odraženou část záření od externího zrcadla, zpět do jádra vlákna. Největší omezení vnáší kvalita použitého vazebního členu (coupleru) F-CPL-S12635, které souvisí s velikostí vnitřní odrazivosti, která způsobuje, že se těžko dosáhne nulové hodnoty výsledné intenzity v interferenčním obrazci, při nastavení dráhového rozdílu $\Delta L = l_c$. Tato závislost je platná pro oba použité zdroje.

Pro jednoznačnější vyhodnocení průběhu výsledné intenzity na osciloskopu, byl za výstup vlákna před detekční PIN diodu zařazen Wollastonův hranol, kterým byl odseparován vždy druhý polarizační stav.

Realizací optického vláknového senzoru s externím Fabry - Perotovým rezonátorem jsme ověřili, že naměřené hodnoty odpovídají základní teorii, avšak při reálné konstrukci jsme omezeni velkou odrazivostí ve vazební části (coupleru). Velká odrazivost vnáší nejednoznačnost při vyhodnocení nulové hodnoty intenzity.

Tento zrealizovaný typ senzoru lze použít také jako didaktickou pomůcku při demonstraci základních vlastností koherentního záření a vlastností optických vláknových senzorů. Senzor s Fabry – Perotovým interferometrem můžeme aplikovat například při měření změn velmi malých vzdáleností a k vyhodnocování změn indexu lomu n mezi čelem vlákna a externího zrcadla.

6. Seznam literatury

[1] Fyzmatik [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide Web:

<http://fyzmatik.pise.cz/1065-opticka-vlakna.html>

[2] PC Tuning – Technologie přenosu dat vlákna [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné

z World Wide Web: [http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-](http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna)

[technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna](http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna)

[3] Maturitní otázky [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide Web:

[\]http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQ](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2)

[\[%2520maturitni%2520otazky%2F12%2520optick%25C3%25A1%2520vl%25C3%25\]\(http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2Felektronika%2520-%2520maturitni%2520otazky%2F12%2520optick%25C3%25A1%2520vl%25C3%25\)](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2Felektronika%2520-</p></div><div data-bbox=)

[A1kna_fila%26p%25C4%259Bn%25C4%258D%25C3%25ADk.doc&ei=ZByZUs6NH7TaygP8g4D4Cg&usg=AFQjCNF0_jGIBA4YIS6MKjnf3B_749wEgQ&bvm=bv.5715](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2Felektronika%2520-%2520maturitni%2520otazky%2F12%2520optick%25C3%25A1%2520vl%25C3%25A1kna_fila%26p%25C4%259Bn%25C4%258D%25C3%25ADk.doc&ei=ZByZUs6NH7TaygP8g4D4Cg&usg=AFQjCNF0_jGIBA4YIS6MKjnf3B_749wEgQ&bvm=bv.57155469,d.bGQ)

[5469,d.bGQ](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2Felektronika%2520-%2520maturitni%2520otazky%2F12%2520optick%25C3%25A1%2520vl%25C3%25A1kna_fila%26p%25C4%259Bn%25C4%258D%25C3%25ADk.doc&ei=ZByZUs6NH7TaygP8g4D4Cg&usg=AFQjCNF0_jGIBA4YIS6MKjnf3B_749wEgQ&bvm=bv.57155469,d.bGQ)

[4] VŠB – Optická vlákna [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide Web:

<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>

[5] Wikipedia – Optické vlákno [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide

Web:

http://cs.wikipedia.org/wiki/Optické_vlákno#Numerick.C3.A1_apertura_.28NA.29

[6] Archiv.cz – Optická vlákna [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide

Web: <http://www.earchiv.cz/a96/a645k150.php3>

[7] Ján Turán, Stanislav Petrik, 1990, Optické vláknové senzory, Vydavatelství ALFA-

Bratislava

[8] A.L. Harmer, přeložil J. Janta, 1986, Československý časopis pro fyziku – zvláštní

otisk, sekce A, Svazek 36, Československá akademie věd

[9] ČVUT – 6sem [online]. [vid. 2014-1-3]. Dostupné z World Wide Web:

http://stepa.wz.cz/cvut/6sem/FOT_vypot.pdf

[10] MUNI [online]. [vid. 2014-1-3]. Dostupné z World Wide Web:

http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CEUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fis.muni.cz%2Fth%2F175140%2Fprif_m%2FTISK1.doc&ei=r8_GUq3iL-rNygOqqoLQDQ&usg=AFQjCNHoLz3Fn4MegohRgYkBBFqP4ChEcA&bvm=bv.58187178,d.bGQ

[11] PUDIL, Karel. Navazování optických vláken. Olomouc, 2011. Dostupné z: online. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra Optiky.

[12] KUCHARSKI, Maciej. Fyzika a vláknová Optika II.: Disperze signálu v jednovidových vláknových vlnovodech-výpočet měření. Praha 8: Polygrafia, Závod 6, 1989. ISBN 80-7015-072-6.

[13] SCHRÖFEL, Josef, Karel NOVOTNÝ, CSC. Optické vlnovody. vyd. = 1. Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1991.

[14] HORÁK Richard., Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů. vyd. = 1. Olomouc: chlup.net, 2012. ISBN 978-80-903958.

[15] VALVODA, Ondřej. Polarizační optické vláknové senzory. Olomouc, 1994. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra Optiky.

[16] Automa - Biosenzory [online]. [vid. 2014-2-7]. Dostupné z World Wide Web:

http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31055

[17] ČVUT – Optické biosenzory [online]. [vid. 2014-2-7]. Dostupné z World Wide Web:

<https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/OPTICKÉ%20%20BIOSENZORY.pdf> – 7.2. 2014

[18] Physics[online]. [vid. 2014-1-3]. Dostupné z World Wide Web:
http://physics-animations.com/Physics/English/ifp_txt.htm - 3.4. 2014

[19] GLOGE, D. Weakly Guiding Fibers.
[http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?got]. 1971, s. 7 [cit. 2014-05-13].
DOI: weakly guiding fiber. Dostupné z: online

7. Seznam obrázků

[1] KOSEK, Jiří. HTML: tvorba dokonalých WWW stránek : podrobný průvodce [online]. Vyd. 1. Praha: Grada, 1998 [cit. 2014-05-13].

[2] Fmanik [online]. [vid. 2013-11-30]. Dostupné z World Wide Web: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fmanik.korh.cz%2Ffiles%2F%25C5%25A1kola%2Fss%2Felektronika%2520-%2520maturitni%2520otazky%2F12%2520optick%25C3%25A1%2520vl%25C3%25A1kna_fila%26p%25C4%259Bn%25C4%258D%25C3%25ADk.doc&ei=4r2ZUojlJojMtQby_4DwDg&usg=AFQjCNF0_jGIBA4YIS6MKjnf3B_749wEgQ&bvm=bv.57155469,d.Yms

[3] Imatte – Okna optických vláken [online]. [vid. 2014-1-1]. Dostupné z World Wide Web: <http://opte.imatte.cz/teorie/opticke-vlakna/30-okna-opticky-ch-vlaken>

[4] VALVODA, Ondřej. Polarizační optické vláknové senzory. Olomouc, 1994. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra Optiky.

[5] Goro - Vlákná [online]. [vid. 2014-1-2]. Dostupné z World Wide Web: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>

[6] Ján Turán, Stanislav Petrik, 1990, Optické vláknové senzory, Vydavateľství ALFA-Bratislava.

[7] Kemt-old - Senzory [online]. [vid. 2014-1-8]. Dostupné z World Wide Web: http://www.kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/KEMT514_F/_materialy/Prednasky/Pr05/FO_5%20Senzory.df

[8] Odborné časopisy [online]. [vid. 2014-2-7]. Dostupné z World Wide Web: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31055

- [9] Physics - Fabry [online]. [vid. 2014-4-9]. Dostupné z World Wide Web:
http://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm
- [10] Physics - Ifp [online]. [vid. 2014-3-4]. Dostupné z World Wide Web:
http://physics-animations.com/Physics/English/ifp_txt.htm
- [11] Vlastní schéma konstrukce Fabry - Perotova interferometru
- [12] Physics - Ifp [online]. [vid. 2014-3-4]. Dostupné z World Wide Web:
http://physics-animations.com/Physics/English/ifp_txt.htm
- [13] Sestava vláknového Fabry - Perotova interferometru
- [14] Fokusační objektiv a laser (635 nm)
- [5] Fokusační objektiv a laser (447 nm)
- [16] Externí zrcátko a optické vlákno – Fabry - Perotův interferometr
- [17] Fabry - Perotův rezonátor
- [18] Wollastonův hranol s PIN diodou
- [19] Vazební člen (coupler) / F- CPL-S12635
- [20] Výstupní módy LP 01 za Wollastonovým polarizátorem
- [21] Výstupní módy LP 11 za Wollast. polarizátorem
- [22] Program řídící keramický piezoposuv
- [23] Naměřený průběh fotoproudu při posuvu externího zrcátka – minimální hodnota při
 $\Delta L = l_c$

[24] Naměřený průběh fotonového proudy při posuvu externího zrcátka – maximální hodnota při $\Delta L = \mathit{min}$