

Návrh a realizace vláknového členu s řízeným zpožděním fáze

Bakalářská práce

Studijní program: **B2612 – Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **1802R022 – Informatika a logistika**

Autor práce: **Libor Pavlíček**

Vedoucí práce: **Ing. Vít Lédl, Ph.D.**



Design and implementation of a fiber element with a controlled phase delay

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 1802R022 – Informatics and Logistics

Author: **Libor Pavlíček**

Supervisor: Ing. Vít Lédli, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Libor Pavlíček**
Osobní číslo: **M11000026**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Informatika a logistika**
Název tématu: **Návrh a realizace vláknového členu s řízeným zpožděním fáze**
Zadávací katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte odbornou literaturu a vypracujte literární rešerši o metodě fázového posuvu, konstrukci fázových zpožďovačů a vlastnostech optických vláken použitých ve zpožďovači. Parametry vláken jako tažnost a mez pevnosti změřte.
2. Navrhněte a sestavte zpožďovač, jako akční člen použijte piezoelektrický stack.
3. Navrhněte a sestavte uspořádání pro testování parametrů zpožďovače i s řízením.
4. V realizovaném uspořádání změřte parametry zpožďovače, především opakovatelnost a přenosovou charakteristiku.
5. Zpracujte a zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

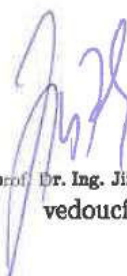
- [1] MALACARA D. Optical shop testing. Wiley-Interscience, 2007.
- [2] MALACARA D., MALACARA Z., SERVIN M., MALCACARA Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, Dekker/CRC Press, 2005.
- [3] FRANCON M., Optical Interferometry, Academic Press, New York 1966.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vít Lédl, Ph.D.**
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Pavel Psota**
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Ostatní konzultanti: **Ing. Petr Vojtššek**
ÚFP AV ČR, v.v.i.

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2015**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




prof. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 20. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 9.9.2015

Podpis: Pawlek

Abstrakt

Při technologickém výzkumu a vývoji v procesu měření a vyhodnocování optických ploch se často využívá schopnosti elektromagnetického záření nazývané interference. S tímto je úzce spjat termín fáze optického signálu a manipulace s ní. Pro správné a absolutní vyhodnocení výsledků je zapotřebí mít možnost s fází optického signálu determinovaně manipulovat.

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na konstrukci a testování vláknového členu s řízeným zpožděním fáze. V práci je diskutován základní princip posunu fáze v souvislosti se změnou délky dráhy šíření optického signálu. Je nastíněna realizace a konstrukce členu s řízeným zpožděním fáze pomocí deformace optického vlákna a funkčnost zařízení je testována s důrazem na opakovatelnost posunu.

Klíčová slova

Posun fáze

Interference

Laser

Vláknová optika

Abstract

For technological research and development in process of measurement and evaluation of optical surfaces a phenomenon called interference is often used. The interference of optical radiation is closely related to an optical phase and manipulation with this phase. For correct and absolute evaluation of results it is necessary to deterministically move the optical phase.

Presented bachelor thesis is focused on a construction and testing of a phase shift controller. In the text, basic principles of phase shifting related to change of the optical path are discussed. Realization and construction of the phase shifter are discussed based on the deformation of the optical fiber. The testing is focused on repeatability.

Key words

Phase shifting

Interference

Laser

Fiber optics

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi při zpracování této bakalářské práce pomáhali nebo mě jakkoli podporovali. V první řadě velice děkuji vedoucímu práce Ing. Vítu Lédlovi Ph.D. za jeho vedení, poskytnutý čas, cenné rady, ochotu a trpělivost při zpracování této práce. Dále děkuji Ing. Petru Vojtíškovi za jeho odborný dohled, poskytnuté rady a získané zkušenosti. Na závěr bych chtěl samozřejmě poděkovat všem, kteří se na práci podíleli za jejich spolupráci.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam zkratk, symbolů a pojmů	10
Úvod	12
1. Základní teoretické pojmy	13
1.1 Světlo	13
1.2 Vlnová rovnice	14
1.3 Šíření světla	14
1.4 Lom světla	15
1.5 Koherence	16
1.6 Interference světla	16
1.7 Fázový posun	19
1.8 Interferometr	19
1.9.1 Michelsonuv Interferometr	19
1.9.2 Younguv interferometr	20
1.10.1 Laser	21
1.10.2 Stimulovaná emise	22
1.10.3 Inverze populace	23
1.10.4 Rezonátor	23
1.11.1 Plynové lasery	24
1.11.2 Pevnolátkové lasery	24
1.11.3 Vláknové lasery	24
1.11.4 Polovodičové (Diodové) lasery	25
2. Vláknová optika	26

2.1	Základní princip optického vlákna.....	26
2.2	Numerická apertura	27
2.3	Modová struktura vlákna	28
2.4	Gradientní optická vlákna s postupnou změnou indexu lomu.....	28
2.5	Optická vlákna s pláštěm a bez pláště	29
3.	Ideový návrh a uspořádání modulátoru.....	30
3.1	Konstrukce vláknového členu s řízeným zpožděním fáze.....	30
3.2	Laserová dioda.....	32
3.3	Piezoelektrický člen.....	32
3.4	Optické vlákno.....	33
3.5	Vláknový dělič a koncovky optických vláken.....	34
3.6	Arbitrární generátor funkcí	34
3.7	Laboratorní zdroj pro přednapětí.....	35
3.8	Konstrukce Huygensova interferometru.....	35
3.9	Trhací testy	36
3.10	Výpočet prodloužení optického vlákna pomocí Hookova zákona	39
3.11	Zapojení phase shifteru v elektrickém obvodu.....	40
4.	Měření posunu fáze	41
	Závěr	46
	Citovaná literatura	47

Seznam obrázků

Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického vlnění.....	13
Obrázek 2: Vlny ve fázi	17
Obrázek 3: Vlny v protifázi.....	17
Obrázek 4: Michelsonuv interferometr	20
Obrázek 5: Younguv experiment [6].....	21
Obrázek 6: Stimulovaná emise.....	22
Obrázek 7: Princip rezonátoru	24
Obrázek 8: Princip fungování optického vlákna.....	27
Obrázek 9: 3D návrh pevných částí phase shifteru.....	30
Obrázek 10: Phase shifter - principiální náčrt	31
Obrázek 11: Piezoelektrický člen.....	33
Obrázek 12: Schéma zapojení phase shifteru.....	35
Obrázek 13: Interferenční pruhy ze snímače CMOS	36
Obrázek 14: Trhací testy vlákna 780HP při délce 10cm - prokluz.....	37
Obrázek 15: Trhací testy vlákna 780HP při délce 30cm – cívka.....	38
Obrázek 16: Trhací testy vlákna 630HP - narušení obalu, přilepení	39
Obrázek 17: Zapojení phase shifteru v elektrickém obvodu.....	40
Obrázek 18: Signál vysílaný přístrojem Rigol DG1022	41
Obrázek 19: Graf počátečních hodnot PI.....	42
Obrázek 20: Graf závislosti napětí na změně velikosti piezo členu	43
Obrázek 21: Graf potřebného napětí k fázovému posunu $\pi/2$	44
Obrázek 22: Graf vyhodnocení pokusu střední hodnoty závislosti napětí na posunu fáze	45

Seznam zkratek, symbolů a pojmů

Phase shifter – Člen s řízeným zpožděním fáze optického signálu

Fázový offset – Posun fáze optického signálu vzhledem k počátku

FC - Ferrule connector. Koncovky optických vláken pro pevné spojení obou konců.

APC – Angled physical contact. Koncovky optických vláken s mírným zkosením zakončení konektoru.

Δ - Laplaceův operátor

NA – Numerická apertura

Θ – Mezní vstupní a výstupní úhel optického vlákna

I_0 – Intenzita světelného signálu

β - Absorpční koeficient.

n – Index lomu

DFB – Distributed FeedBack

Seznam užitých jednotek soustavy SI

l	Vzdálenost	[m]
m	Hmotnost	[kg]
t	Čas	[s]
I	Elektrický proud	[A]
T	Teplota	[°C]
n	Látkové množství	[mol]
f	Kmitočet	[s ⁻¹]
U	Elektrické napětí	[V]
F	Síla	[N]
P	Výkon	[W]
R	Elektrický odpor	[Ω]
λ	Vlnová délka	[m]

Úvod

V centru TOPTEC je vyvíjena řada měřicích přístrojů pro přesné měření vlastností optických povrchů. Většina těchto přístrojů je založena na principu interference dvou optických vln, tyto přístroje se nazývají optické interferometry. Pro schopnost absolutního vyhodnocení je vhodné mít možnost řízeně posouvat s fází optického signálu.

S ohledem na výše uvedené bylo cílem této bakalářské práce nejprve se seznámit s danou problematikou týkající se optické interference, interferometrů a vláknové optiky. Následně na základě získaných vědomostí navrhnout element pro řízený posun fáze optického signálu, element sestavit a v poslední fázi otestovat s důrazem na linearitu chodu a na opakovatelnost posunu fáze.

První dvě kapitoly textu jsou věnovány rešerši na téma elektromagnetické vlnění, interference světla, laser, interferometry a vláknová optika. Cílem rešeršní části je seznámení a osvojení si pojmů z definovaných témat a představení principů šíření elektromagnetického vlnění. V rešeršní části jsou dále popsány základní principy fungování optického vlákna, nastíněn princip interferometrů, šíření světla v různých prostředích a vysvětleny principy fungování laseru.

Druhá část bakalářské práce je věnována vlastní realizaci elementu pro posun fáze a související problematice. Jsou zde popsány všechny prvky použité ke konstrukci zmíněného členu. Dále je vysvětlen a popsán Huygensuv interferometr sloužící k otestování realizovaného elementu.

Poslední kapitola bakalářské práce je věnována samotnému měření a ověření funkčnosti elementu pro posun fáze, které bylo provedeno v Regionálním centru speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC v Turnově.

1. Základní teoretické pojmy

Jelikož se budeme zabývat šířením světla v optickém vláknu, je zapotřebí nejprve definovat pár základních pojmů.

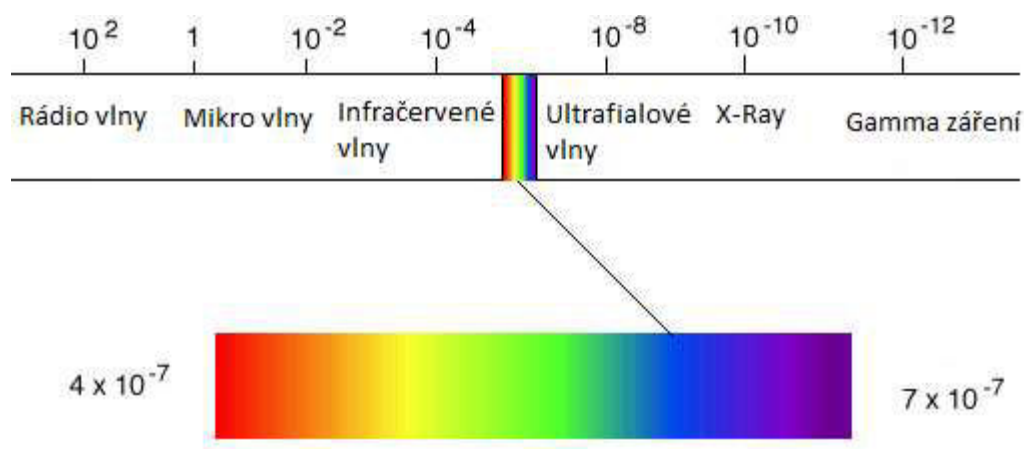
1.1 Světlo

Prvním stavebním kamenem pro porozumění problematiky vláknové optiky je určit, co je světlo. Obecně se elektromagnetické vlnění skládá z širokého spektra vlnových délek, potažmo frekvencí (Obrázek 1). Nejčastěji se světlo uvažuje jako viditelná část optického záření, ale z obecnějšího hlediska lze do tohoto pojmu zahrnout i blízkou oblast infračerveného záření. Z Obrázku 1 je tedy zřejmé, že světlo jsou elektromagnetické vlny o vysokých frekvencích ($\sim 500\text{THz}$). [1] [13]

Vztah mezi frekvencí (f) a vlnovou délkou (λ) je

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

kde c je rychlost světla v daném materiálu.



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického vlnění.

1.2 Vlnová rovnice

Vlnová rovnice popisuje obecné vlnění v oblasti akustiky, optiky, taktéž popisuje i vlnění kapalin a strun, je hyperbolickou parciální diferenciální rovnicí druhého řádu. Vlnová rovnice lze vyjádřit jako:

$$\Delta z = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 z}{\delta t^2}$$

„z“ přitom představuje skalární funkci polohy a času. Kdy Δz můžeme vyjádřit jako součet druhých parciálních derivací funkce Z v uvažovaných směrech. [1] [4]

$$\Delta z = \frac{\delta^2 z}{\delta x_1^2} + \frac{\delta^2 z}{\delta x_2^2} + \frac{\delta^2 z}{\delta x_3^2} + \dots \cdot \frac{\delta^2 z}{\delta x_n^2}$$

1.3 Šíření světla

Šíření světla je ovlivněno vlastnostmi prostředí, jímž světlo prochází. Mohou nastat tyto případy:

1. Průchod světla téměř beze změny v čirém prostředí.
2. Absorpce světla – Pohlcení světla při dopadu do prostředí.

Lambert-Beerův zákon určuje absorbanci, veličinu charakterizující míru absorpce v látce.

$$I = I_0 e^{-\beta \delta}$$

kde I je intenzita světla po průchodu prostředím o tloušťce δ , přičemž I_0 představuje intenzitu prošlého světla pro $\delta = 0$, tj. při nulové tloušťce vrstvy. Konstanta β je absorpční koeficient. Konstanta $e^{-\beta \delta}$ bývá označována jako propustnost.

3. Rozptyl světla - nepravidelně se mění směr šíření světla v prostředí s rozptylujícími centry.
4. Odraz světla – světlo se od prostředí odráží, například zrcadla.

Látky, kterými se světlo šíří, označujeme jako optická prostředí. Z hlediska optických vlastností může být optické prostředí:

1. Opticky homogenní. Optické prostředí, které má v celém svém objemu stejné optické vlastnosti.
2. Opticky izotropní. Prostředí, jehož vlastnosti jsou nezávislé na směru.
3. Opticky anizotropní. Prostředí, jehož vlastnosti závisí na směru šíření světla, nebo polarizaci. Takové prostředí má tedy v různých směrech různé vlastnosti, např. některé typy krystalů, či některé polarizační filtry, které propouštějí pouze světlo určité polarizace. [1] [2] [4]

1.4 Lom světla

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou optických prostředí o různých indexech lomu, pak se částečně odráží a částečně prochází z jednoho prostředí do druhého. Tento jev nazýváme odraz a lom světla.

Zákon odrazu: Dopadá-li světlo na rozhraní dvou prostředí pod úhlem α , odráží se s úhlem α' . Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α , tj. $\alpha = \alpha'$. Odražený paprsek leží v rovině dopadu. Rovina dopadu je definována směrem dopadu a kolmicí na rozhraní.

Zákon lomu: Dopadá-li paprsek z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 , dochází k lomu paprsku. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu. Úhel dopadu značíme α , úhel lomu značíme β . [1]

Pro tyto úhly přitom platí:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_2}$$

Index lomu optického prostředí n je veličina daná poměrem rychlosti světla ve vakuu c a rychlosti světla v v daném prostředí.

Pro index lomu platí:

$$n = c/v$$

Index lomu vzduchu:

$$n = 1,000272$$

Index lomu skla:

$$n = 1,5$$

1.5 Koherence

Koherentním vlněním rozumíme vlnění o jednotné frekvenci a polarizaci.

Koherence je důležitá právě při skládání vln. To zdali vlny interferují, ať už destruktivně, či konstruktivně, záleží to na jejich vzájemném fázovém posunu.

Dvě vlny jsou koherentní, pakliže jejich fázový rozdíl je konstantní a tudíž mají stejnou vlnovou délku.

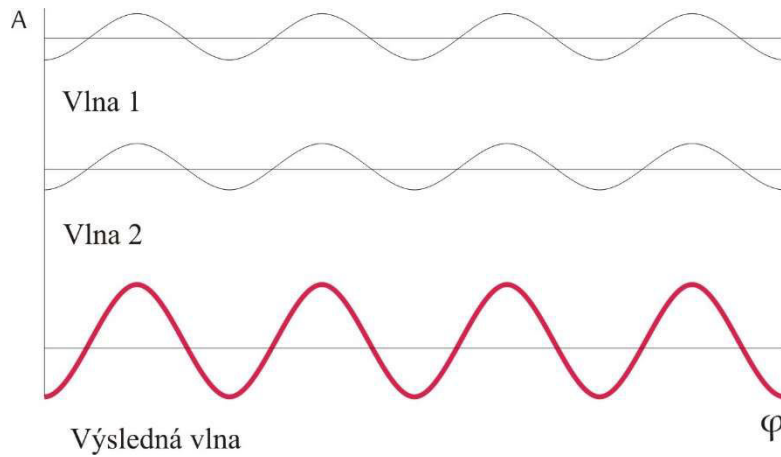
Koherencí rozumíme vzájemnou souvislost fáze a amplitudy vlnění. Koherencí časovou rozumíme vlnění vycházejícího z jednoho místa, avšak měřenou s určitým časovým odstupem. [1] [5]

1.6 Interference světla

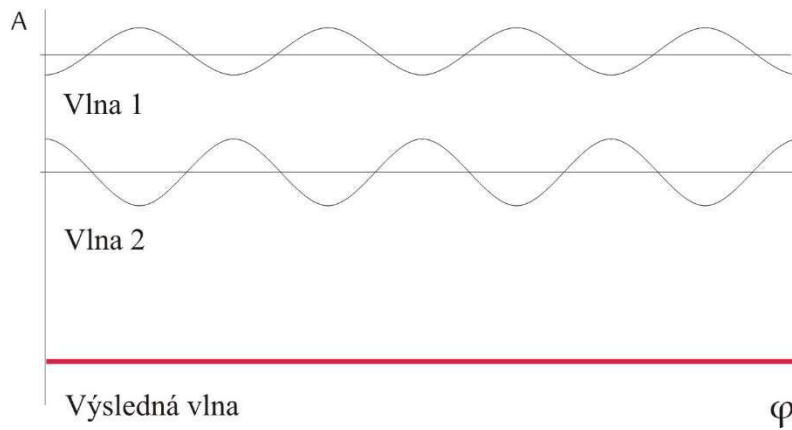
Pojmem interference světla rozumíme jevy na základě skládání vln. U elektromagnetického záření se interference projevuje zesilováním a zeslabováním intenzity záření v různých místech. Pozorovatelný intervenční jev nastává mezi zářením, které je koherentní. Jev interference vzniká i pro nekoherentní vlnění, díky rychlosti změn nejsme však schopni interferenci detekovat. [1] [2]

Interference je superpozice dvou nebo více světelných vln. Pro to, aby tento jev mohl vzniknout, musí být zajištěno několik podmínek.

- Interferující vlny mají dostatečnou koherenci
- Interferující vlny mají stejnou polarizaci
- Interferující vlny mají stejnou vlnovou délku (Obrázek 2, Obrázek 3)



Obrázek 2: Vlny ve fázi



Obrázek 3: Vlny v protifázi

Ke studiu jevu nazývaného interference použijeme matematický aparát vlnové optiky, který je pro tyto účely vhodný. Světlo, tedy elektromagnetické záření, popisujeme pomocí vektoru elektrické intenzity. [1] [2]

$$\vec{E}(\vec{r}, t)$$

Tyto vektory jsou vektory funkcí polohy a času. Pro názornost a jednoduchost se omezíme na monochromatické rovinné vlny v nemagnetickém prostředí šířící se pouze ve stejném směru z a mající stejné frekvence a stejnou polarizaci. V tomto případě používáme k popisu elektromagnetické vlny skalární komplexní amplitudu

$$U(z, t) = Ae^{i(\omega t - kz)}$$

, kde A je maximální amplituda vlny, t označuje čas, k je vlnový vektor a ω je úhlová rychlost definovaná

$$\omega = 2\pi f$$

přičemž f je frekvence vlny. Při interferenci dochází k součtu okamžitých amplitud jednotlivých vln, což zapíšeme vztahem

$$U = U_1 + U_2$$

kde U je okamžitá amplituda výstupní vlny a U_1 , U_2 popisují interferující vlny. Předpokládejme, že jedna z vln bude vůči druhé časově opožděna o interval t_z . Po dosažení do vztahu obdržíme

$$U = A_1 e^{i(\omega t - kz)} + A_2 e^{i(\omega(t+t_z) - kz)}$$

kde jsme zavedli fázový posuv jako

$$\varphi = \omega t_z$$

Zavedeme veličinu intenzity, jež je definována jako hodnota energie vlny, která protéká za jednotku času jednotkovým plošným obsahem

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (E^2)$$

kde c je rychlost světla, μ je permeabilita prostředí a ε permitivita prostředí. V aproximaci pomocí skalární komplexní amplitudy U odpovídá vztah pro intenzitu

$$I = |U^2|$$

S pomocí vztahů a odvodíme vztah pro výslednou intenzitu dvou interferujících vln

$$I = I_1 + I_2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi)$$

I_1 a I_2 označují intenzity interferujících vln. Podstatným výsledkem našich úvah je tzv. interferenční člen

$$I_v = 2A_1A_2 \cos(\varphi)$$

který nám určuje povahu interference.

Konstruktivní interference:

$$I_v > I_1 + I_2$$

Destruktivní interference:

$$I_v < I_1 + I_2$$

Interferenční člen nám říká, že intenzita výsledné vlny nemusí být vždy rovna součtu intenzit jednotlivých vln, díky čemuž můžeme měřením intenzity interference a znalosti intenzity vstupních vln určovat fázové rozdíly mezi vlnami. Měření fázového rozdílu vln je základním stavebním kamenem interferometrie. [1] [2]

1.7 Fázový posun

Pro indikaci a popis fáze v harmonických vlnách se používá zlomek periody, který uplynul vzhledem k počátku.

Pokud máme dvě vlnění o fázích φ_1 a φ_2 fázovým rozdílem rozumíme:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

Fázovým posunem rozumíme změnu mezi fázovým rozdílem.

[1] [8]

1.8 Interferometr

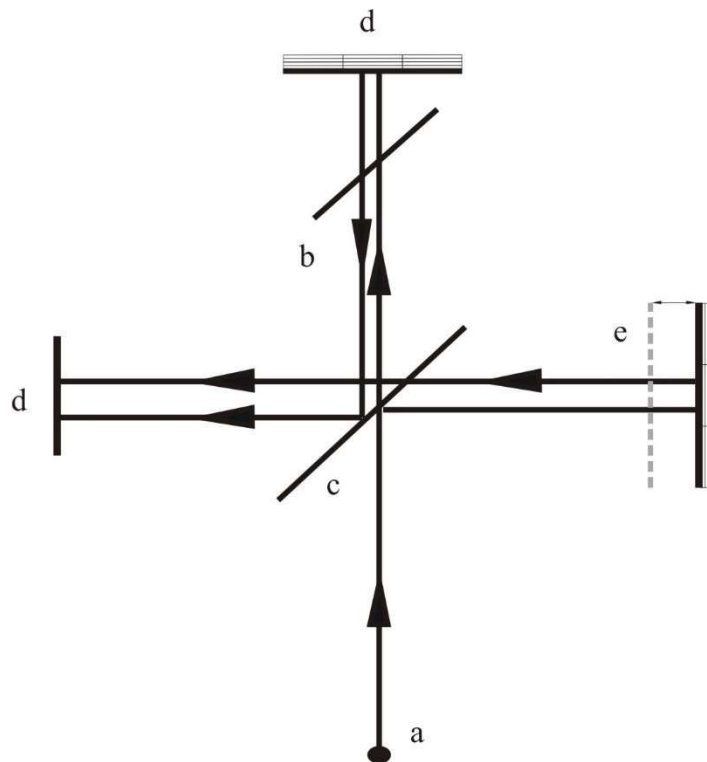
Interferometr je přístroj pro velmi přesná měření, jehož princip je založen na interferenci světla. Interferometry se používají k měření délek, k určení indexů lomu u plynů a u kapalin. Interferometr je přístroj používaný k měření na principu posunu fáze koherentního elektromagnetického vlnění.

1.9.1 Michelsonuv Interferometr

Pro demonstraci základních principů interferometru si představíme jeden z nejznámějších interferometrů. Interferometr poprvé sestavený Albertem Abrahamem Michelsonem v roce 1881. (Obrázek 4) se skládá ze zdroje světla (a), polopropustného zrcadla (b), kompenzační desky (c), pevného rovinného zrcadla (d) a pohyblivého rovinného zrcadla (e), které kopíruje měřený rozměr. Na detektoru pak jednoduše z

interferenčního obrazce můžeme rozpoznat nepatrné posunutí posuvného zrcadla. Za pomoci Michelsonova interferometru byla definována jednotka jeden metr. Za tuto definici a pokus byla Michelsonovi udělena Nobelova cena.

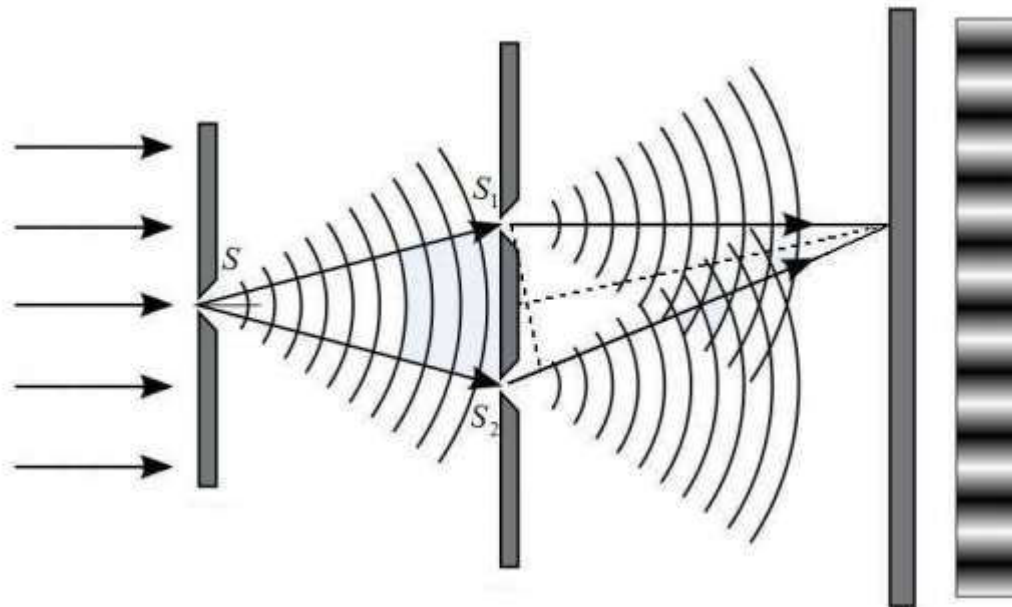
[5]



Obrázek 4: Michelsonuv interferometr

1.9.2 Younguv interferometr

Když v roce 1801 anglický lékař a fyzik Thomas Young experimentálně prokázal, že světlo je vlna, ovlivnil řešení sporu, v němž se střetly názory na podstatu světla. Při pokusu světlo z monochromatického zdroje osvětluje štěrbinu S. Světlo se z této štěrbinu, která má vlastnost bodového zdroje, šíří všemi směry a dopadá na dvojici štěrbin S_1 a S_2 . Pokud je vzdálenost těchto štěrbin malá, jsou světelná vlnění za štěrbinami koherentní a my pozorujeme na dostatečně vzdáleném stínítku interferenci. Vzniká interferenční obrazec v podobě soustavy světlých a tmavých proužků.



Obrázek 5: Younguv experiment [6]

1.10.1 Laser

Laser je zařízení, které vyzařuje světlo prostřednictvím procesu optického zesílení na základě stimulované emise elektromagnetického záření. Termín "laser" vznikl jako zkratka pro anglické "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Laser se liší od jiných zdrojů světla především tím, že vyzařuje velmi specifické záření. Navíc lze dosáhnout velmi úzkého svazku, který má nízkou rozbíhavost. Lasery mají také vysokou časovou koherenci, která je způsobena tím, že vyzařují na velmi úzké spektrální čáře (jsou tzv. monochromatické). [11]

Lasery se skládají ze tří základních částí:

1. Aktivní prostředí
2. Zdroj pro čerpání
3. Rezonátor

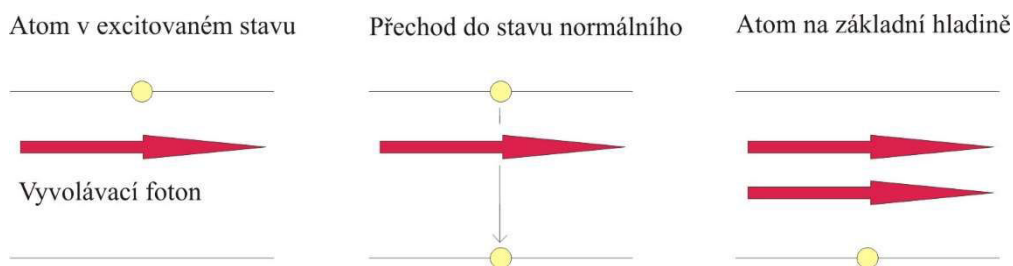
Lasery mají mnoho důležitých použití. Často se také s lasery pracuje v technologickém výzkumu a vývoji, kde se nejčastěji využívá vlastností světla pro jemné měření fyzikálních veličin. Lasery se používají jak v optických vláknech, tak ve volném prostoru optické komunikace. [11] [7]

1.10.2 Stimulovaná emise

Stimulovaná emise je princip vyzáření koherentního fotonu, vyvolaný fotonem stejné vlnové délky. Současně atom v excitovaném stavu přechází do stavu normálního. Stimulovaná emise se využívá v laserech právě kvůli tomu, že díky ní jsme schopni vyzářit velké množství fotonů o stejných vlastnostech.

Platí pravidlo, že fotony vzdálenější od jádra atomu mají větší energetickou hladinu. Tudíž nachází-li se foton ve vzdálenosti větší od jádra, nežli je hladina základní, říkáme, že foton je v excitovaném stavu.

Stimulovanou emisí tedy rozumíme proces, při kterém přichází foton specifické frekvence může interagovat s atomem v excitovaném stavu, což způsobuje, že elektron poklesne na nižší úroveň energie. Tento proces přenáší energii do elektromagnetického pole a vytvoří foton s identickou fází, frekvencí, polarizací a směrem vyzáření jako foton dopadající vlny. Viz Obrázek 6 [11]



Obrázek 6: Stimulovaná emise

1.10.3 Inverze populace

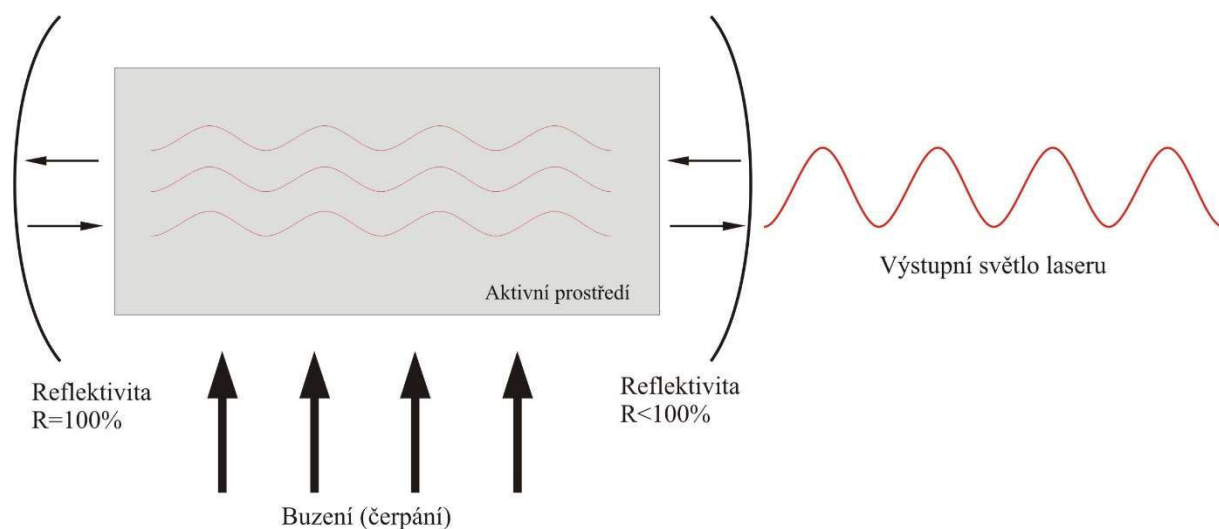
K inverzi populace dojde, pokud systém (jako je skupina atomů nebo molekul) existuje ve stavu s více členy ve vybuzeném stavu než v nižších energetických stavech. Tento stav se nazývá "populace hladin". V mnoha známých, běžně se vyskytujících systémech, to není možné. Koncept má zásadní význam v laserové vědě, neboť právě inverze populace je nezbytným krokem ve fungování laseru.

Pakliže je tedy více elektronů v atomu v excitovaném stavu, dochází k inverzi populace. Čerpací zdroj nám neustále dodává energii potřebnou k excitování elektronů. Pokud se atom již dostal na metastabilní hladinu, stimulující foton spouští mechanismus stimulované emise. Elektron se tedy vrátil na základní hladinu a čerpací zdroj znovu poskytuje energii k excitování elektronu a zopakování celého cyklu. [7]

1.10.4 Rezonátor

Rezonátor má za úkol navrátit část stimulovaných fotonů do aktivního prostředí. Ke sjednocení směru fotonů v rezonátoru používáme soustavu zrcadel. První zrcadlo je extrémně reflektivní, až z 99,8%, druhé zrcadlo je polopropustné. To se nazývá výstupní vazební člen, protože umožňuje části světla opustit dutinu a vytvořit tak výstupní paprsek laseru. Pokud foton letí směrem jiným než kolmým na zrcadlo, dostává se mimo osu zrcadla a odráží se do okolí. U těchto fotonů nebude docházet k zesilování. Pravděpodobně se bude mezi soustavou zrcadel nacházet velké množství fotonů, letících kolmo na zrcadlo, které budou zesilovány stimulovanou emisí.

Světlo ze zdroje, produkované spontánní emisí, se odráží od zrcadla zpět do zdroje, kde je zesíleno stimulovanou emisí. Část elektromagnetického záření prochází přes polopropustné zrcadlo a je výstupním svazkem. Konstrukce a uspořádání zrcadel s ohledem na prostředí, je rozhodující pro určení přesné provozní vlnové délky a dalších atributů laserového systému. [7] [11]



Obrázek 7: Princip rezonátoru

1.11.1 Plynové lasery

Plynové lasery používají jako aktivní prostředí plyn, který lze excitovat různými způsoby. Excitace probíhá většinou pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu. Plynové lasery mají homogenní prostředí, díky kterým mají tyto lasery vynikající parametry. Nejrozšířenější je helium-neonový laser s červeným nebo zeleným paprskem. V medicíně a v průmyslu se nejvíce využívá CO₂ laser o vlnové délce na úrovni infračerveného záření. Zvláštní případ laserů nazývaných excimerové lasery, které jsou zdrojem ultrafialového a jsou zmíněné níže.

[1] [7] [4]

1.11.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkový laser je laser, který používá aktivní prostředí, které je pevné, nejčastěji monokrystal. Buzení je nejčastěji optické a to buď výbojkami, nebo laserovými diodami.

1.11.3 Vláknové lasery

Vláknové lasery jsou podtypem pevnolátkových laserů, kde aktivní médium je tvořeno optickým vláknem obohaceným například atomy erbia nebo yterbia. Buzení je provedeno pomocí laserových diod, kdy vyvolávací fotony jsou do média přivedeny optickým vláknem. Jelikož aktivní prostředí může dosahovat velkých rozměrů, výkony laserů dosahují až 40kW. [1] [10]

1.11.4 Polovodičové (Diodové) lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je elektrická polovodičová dioda. Sice tyto lasery mají relativně vysoký výkon, ale mají nízkou kvalitu výstupního svazku. Výkon diodových laserů se udává v mW až kW. Často jsou miniaturních rozměrů a používají se v CD/DVD přehrávačích, laserových tiskárnách apod. Diodové lasery s vysokým výkonem se v průmyslu používají zejména na svařování kovů i plastů a kalení.

Polovodičové lasery jsou tedy jedny z nejrozšířenějších laserů, které se používají. Výhodou jsou velmi malé rozměry, díky menším rozměrům mají tyto lasery, na rozdíl od ostatních, problém s větší rozbíhavostí. Výkon laserové diody výkon se dá lehce měnit změnou elektrického proudu. Polovodičový laser o vlnové délce 773nm byl použit k experimentálnímu testování funkčnosti konstruovaného členu.

2. Vlákenná optika

2.1 Základní princip optického vlákna

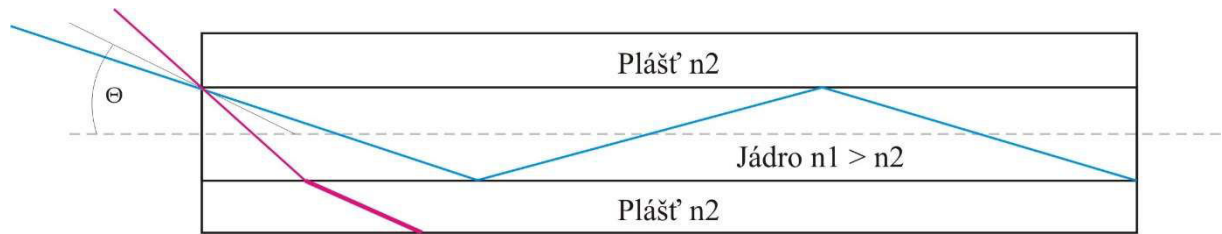
Fyzikální jev, na kterém principiálně funguje optické vlákno, se nazývá totální reflexe. Pokud světlo, dopadající na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu, dopadá pod úhlem menším, než je kritický, nastává jev, zvaný totální reflexe. V takovém případě rozhraní funguje jako extrémně reflexivní zrcadlo a odráží paprsek pod úhlem, který se rovná úhlu dopadu. Velikost kritického úhlu závisí na indexech lomu obou prostředí. Jelikož i například sklo má značně vyšší index lomu než vzduch.

Optické vlákno je nejčastěji vyráběno z křemenného skla, či plastu, přenášející tok elektromagnetického signálu. Díky svým vlastnostem, jako jsou například malá ztrátovost, jsou často optická vlákna používána k přenosu informací na vzdálenosti až několika stovek kilometrů. Zároveň jsou vlákna imunní vůči elektromagnetickému rušení.

Pokud je povrch skleněného vlákna znečištěn, dochází k vyvazování optického signálu z vlákna, resp. v místě znečištění nedochází k totální reflexi, nebo se optický signál odráží pod jiným úhlem a dostává se nad mezní úhel potřebný k totální reflexi. Optická vlákna jsou nejčastěji konstruována s jádrem obklopeným pláštěm, které má lehce nižší index lomu.

Velikost kritického úhlu pro totální reflexi, závisí na kvadratickém rozdílu indexů lomu obou prostředí.

$$n \sin \theta = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$



Obrázek 8: Princip fungování optického vlákna

Na obrázku 8 je znázorněn princip fungování optického vlákna. To je tvořeno jádrem n_1 z materiálu s vyšším indexem lomu, obklopeným pláštěm n_2 z materiálu s nižším indexem lomu. Materiálem jádra a pláště je často křemenné sklo, ale existují i vlákna z plastů nebo kombinace skla a plastu. Aby mohlo docházet mezi jádrem a pláštěm k totální reflexi, musí paprsek na jejich rozhraní dorazit pod úhlem menším než kritickým. Na obrázku splňuje tuto podmínku modře znázorněný paprsek. Paprsek, který vstoupí do vlákna pod větším úhlem, než je úhel θ se odrazí jen částečně, zbytek energie se zlomí do pláště a z pláště ven. Na obrázku je tento paprsek znázorněn červenou barvou. Pro úspěšný odraz světla totální reflexí vláknem je tedy nutno do něj přivádět paprsky pouze v rozmezí úhlů do maximálního úhlu θ na obrázku znázorněném šedou barvou.

[1] [9]

2.2 Numerická apertura

Důležitou charakteristikou optického vlákna je numerická apertura (NA). Numerická apertura udává maximální úhel, pod jakým mohou světelné paprsky do optického vlákna dopadat tak, aby se jím mohly šířit bez vyvazování mimo optické vlákno. Numerická apertura je sinus mezního úhlu násobený indexem lomu okolí.

$$NA = n_a \sin(\theta_a)$$

Numerickou aperturu pro optické vlákno lze také vypočítat jako odmocninu z rozdílu druhých mocnin indexů lomů jádra a obalu optického vlákna.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

2.3 Modová struktura vlákna

V optickém vlákně se záření šíří ve formě modů. Každý mod šířící se podél osy vlnovodu má určitou hodnotu koeficientu šíření a grupové rychlosti, zachovává si své příčné rozložení a polarizaci a je vlastně dán pozicí rovinných vln, šířících se prostřednictvím mnohonásobných odrazů pod úhlem menším, než je úhel mezní. Je-li poloměr jádra dostatečně malý, může se jím šířit pouze jediný mod a hovoříme o tzv. jednomodovém vlákně. Vlákna s větším průměrem jsou mnohomodová.

Jeden z problémů objevující se při šíření mnohomodovými optickými vlákny vyplývá z různé grupové rychlosti jednotlivých modů, což má za následek jejich různé doby průchodu vláknem. Při šíření impulsu vláknem tedy dojde k jeho rozšíření. Tento jev nazývaný modová disperze omezuje rychlost, se kterou mohou být dva po sobě následující impulsy vyslány, aniž by během šíření došlo k jejich překrytí, tj. rychlost, s jakou může optický vláknový komunikační systém pracovat.

[1] [9]

2.4 Gradientní optická vlákna s postupnou změnou indexu lomu

Modovou disperzi lze snížit vhodným příčným profilem indexu lomu, který má největší hodnotu v ose jádra a směrem k plášti postupně klesá, přičemž na jejich rozhraní dosáhne minima. Toto vlákno se nazývá gradientní nebo vlákno s postupnou změnou indexu lomu, zatímco běžná vlákna s konstantním indexem lomu v jádře a plášti se nazývají vlákna se skokovou změnou indexu lomu. V gradientních vláknech vzrůstá rychlost šíření s rostoucí vzdáleností od osy (následkem klesajícího indexu lomu). Paprsky, které protínají osu vlákna pod větším úhlem, urazí sice delší dráhu, ale vyšší rychlostí. V důsledku toho mohou být doby průchodu jednotlivých paprsků vláknem stejné. Tedy optická vlákna

můžeme klasifikovat jako gradientní nebo se skokovou změnou indexu lomu a jako mnohomodová či jednomodová.

[4] [9]

2.5 Optická vlákna s pláštěm a bez pláště

Vlákno z křemenného skla má parametry $n_1 = 1,46$ a $d = 0,01$. $((n_1 - n_2)/n_1)$

Doplňk mezního úhlu

$$\alpha_c = \arccos(n_2/n_1) = 8,1$$

a hodnota příjmového úhlu $\alpha_a = 11,9^\circ$, odpovídá numerické apertuře

$$NA = 0,206.$$

Porovnejme toto vlákno s vláknem bez pláště. Respektive porovnejme toto vlákno s vláknem opláštěným vzduchem. Kde $n_1 = 1,46$ a $n_2 = 1$ a jenž má parametry

$$\alpha_c = 46,8^\circ \quad \alpha_a = 90^\circ \quad \text{a} \quad NA = 1.$$

Přestože světelná kapacita tohoto vlákna je vysoká, není vhodné jako optický vlnovod a to z důvodu velkého počtu přenášených modů.

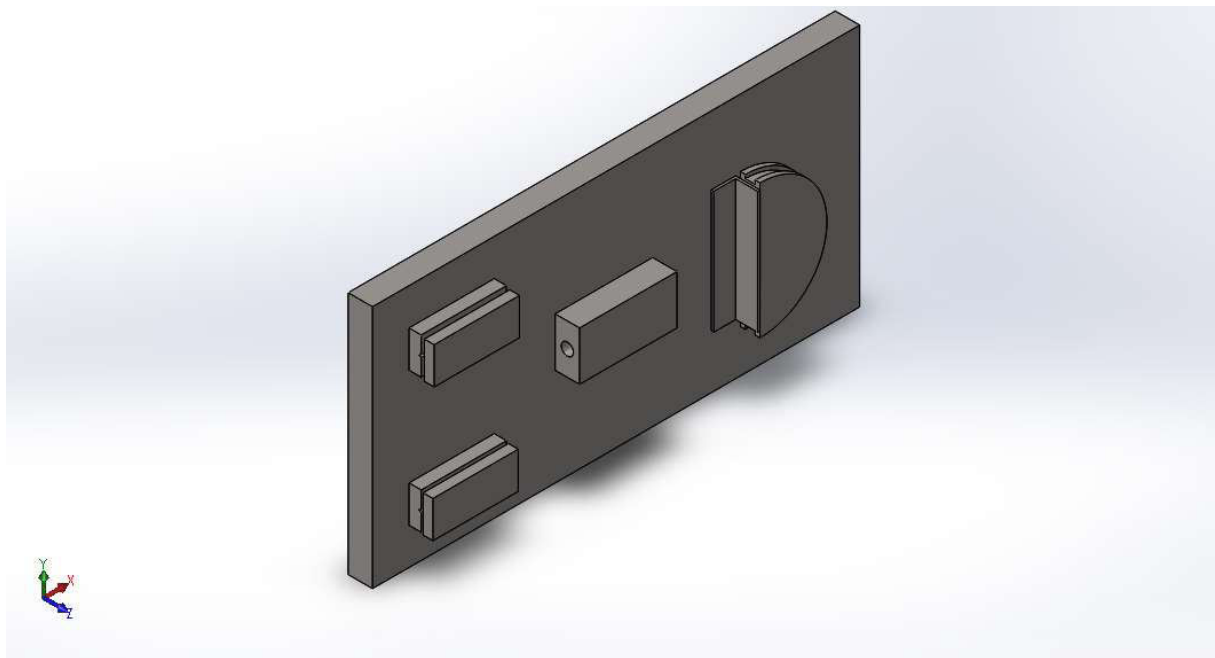
3. Ideový návrh a uspořádání modulátoru

3.1 Konstrukce vláknového členu s řízeným zpožděním fáze

Posunutí fáze optického signálu může být docíleno například prodloužením délky cesty světla od zdroje ke snímači. Na této základní teorii je založen celý princip konstruovaného členu. Jelikož máme elektromagnetický signál naveden v optickém vlákně, stačí nám pouze jeho prodloužením a zkrácením řídit fázi elektromagnetického signálu ve vlákně.

Konstrukce členu vychází z již dříve zakoupeného vláknového členu na posun fáze, bohužel funkčnost tohoto členu nebyla dostačující. Vylepšením jeho konstrukce s možností předeptnutí vlákna, by mělo být dosaženo lepších výsledků.

Původně pro ukotvení vlákna mělo být použito jeho přilepení do vyfrézovaných drážek. Z důvodu nepraktičnosti výměny vlákna při jeho poškození je vlákno uchyceno pomocí jednoduchých šroubů s podložkami.

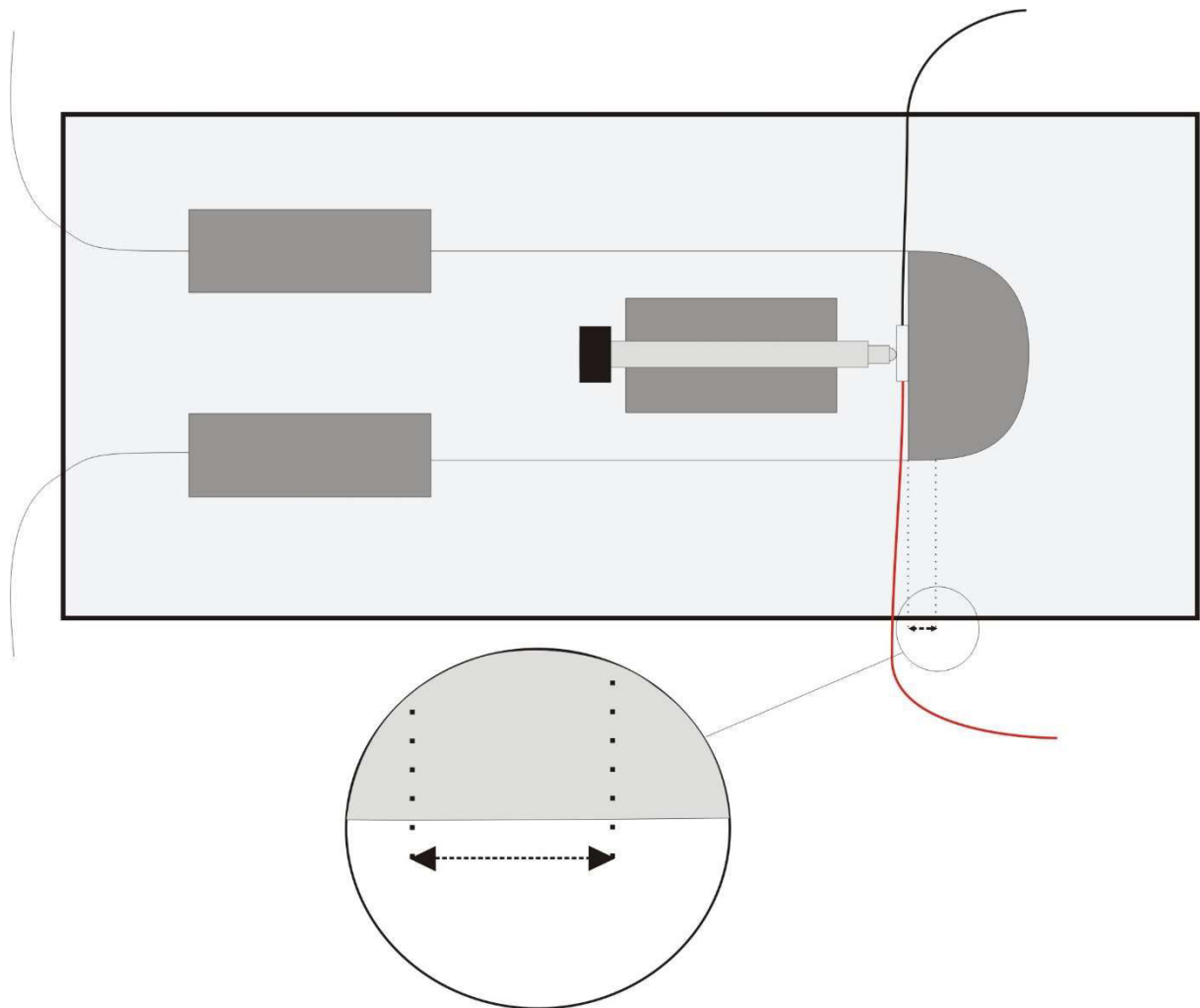


Obrázek 9: 3D návrh pevných částí phase shifteru

Optické vlákno je z bodu přichycení navedeno do drážky půlkruhového vodiče, přes který je vedeno zpět do druhého místa uchycení.

Pro předpnutí vlákna jsme zvolili diferenciální šroub s velmi nízkým stoupáním od firmy THORLABS. Šroub je pevně přichycen k podstavě a opírá se o volně připevněnou cívku. Při dotažení šroubu se cívka vzdaluje od uchycení, naopak při jeho povolání se díky pružnému uchycení cívka vrací do původní pozice. Tímto způsobem je možno vlákno navedené na cívce předpnout do požadovaného napětí.

Mezi šroubem a pružně uloženou cívkou se nachází piezoelektrický člen, který v závislosti na přivedeném napětí svým roztažením a smrštěním jemně koriguje vzdálenost cívky od uchycení vlákna a tím také míru napružení vlákna. Předepnutí vlákna zajišťuje lineární chod členu.



Obrázek 10: Phase shifter - principiální nákres

3.2 Laserová dioda

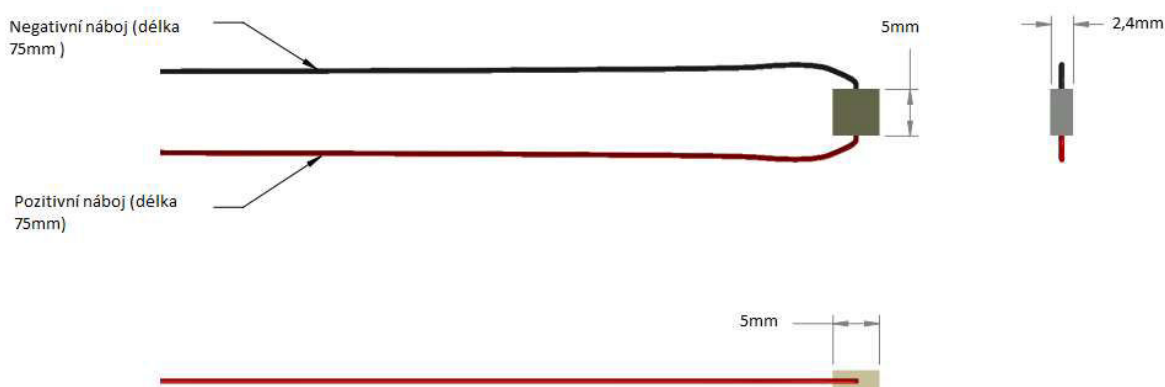
K ověření funkčnosti, opakovatelnosti a stability jsme zvolili diodu polovodičového laseru o centrální vlnové délce 773nm, tedy laser na hranici viditelnosti, o výstupním výkonu 5mW.

3.3 Piezoelektrický člen

Použitý piezoelektrický člen (stack) dodala firma THORLABS, konkrétně jde o piezoelektrický člen TA0505D024W. Piezoelektrický člen se po přivedení potřebného napětí díky schopnosti elektrostriktce krystalu deformuje a zvětšuje svojí tloušťku.

Technické parametry TA0505D024W:

Rozsah napětí	0-75V
Rozsah pohybu	2.8 $\mu\text{m} \pm 15\%$
Hystereze	<15%
Doporučené zatížení	400N
Operační frekvence	315-400kHz
Operační teplota	-25 až 130 °C
Impedance	50 m Ω
Váha	1g



Obrázek 11: Piezoelektrický člen

3.4 Optické vlákno

Použité optické vlákno dodala firma SQS Nová Paka. Použité optické vlákno PM630-HP je jednovidové, udržující polarizaci. Bez problému vede světlo o vlnových délkách 620 – 850nm, což pro naše potřeby dostačuje. Optické vlákno je zapouzdřeno v bužírce, která ho ochraňuje před mechanickým poškozením.

Technické specifikace PM630-HP:

Průměr jádra	3,5 μm
Průměr pláště	125 \pm 2 μm
Průměr claddingu	245 \pm 15 μm
Materiál claddingu	UV tvrzený akrylát
Numerická apertura	0,12
Operační vlnová délka	620-850nm

3.5 Vláknový dělič a koncovky optických vláken

Pro propojení optických vláken byly zvoleny konektory typu FC. FC konektory jsou vhodný typ pro jednomodová vlákna. Obsahují ochranné pouzdro s 2,5 mm průměrem, do kterého je vloženo vlákno. Nevýhodou těchto konektorů je riziko poškrábání konce vlákna. FC konektory poskytují dobrou mechanickou izolaci kontaktu, což umožňuje použití v prostředí se zvýšenými vibracemi, ale je třeba, aby byly zabezpečeny ochrannou objímkou.

Použité FC konektory typu APC používají zkosené konce vláken, aby se dosáhlo vysoké vratné ztráty (a to i v odpojeném stavu), ale obvykle za cenu zvýšení útlumu. Pokud jsou šikmá vlákna správně vložena, tyto povrchy koncovek do sebe zapadají.

Použitý vláknový dělič rozděluje vedený signál při vlnové délce 773nm v poměru 50:50.

3.6 Arbitrární generátor funkcí

Pro generování funkce rampy byl použit přístroj RIGOL DG1022 řízený pomocí rozhraní USB.

Technické specifikace RIGOL DG1022:

2 výstupní kanály, zabudované počítadlo, 20MHz maximální výstupní frekvence 5 MHz
Monochromatický LCD displej, standardní křivky a DC výstupy. 48 přednastavených křivek,

Multifunkční modulace funkce: AM, FM, PM, FSK, a lineární / logaritmické Pilové a Pulzní průběhů výstupy. Konektivita: USB

3.7 Laboratorní zdroj pro přednapětí

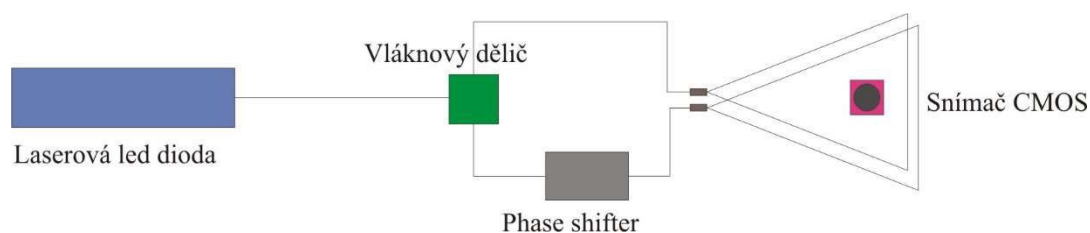
Jelikož charakteristika piezoelektrického členu není lineární v celém pracovním rozsahu 70V, je zapotřebí do elektrického obvodu přivést přednapětí. Z důvodu nemožnosti nastavení přednapětí na generátoru vlny RIGOL DG1022 jsme byli nuceni použít v sériovém zapojení laboratorní zdroj PROTEK PL-3005T s maximálním napětím 30V při proudu 5A, kterým jsme do elektrického oběhu přivedli napětí 20V.

3.8 Konstrukce Huygensova interferometru

Pro ověření funkčnosti postaveného phase shifteru bylo zapotřebí postavit jednoduchý interferometr, na kterém byla ověřena funkčnost posunu fáze elektromagnetického signálu. Pro naše potřeby byla zvolena jednoduchá verze Huygensova interferometru.

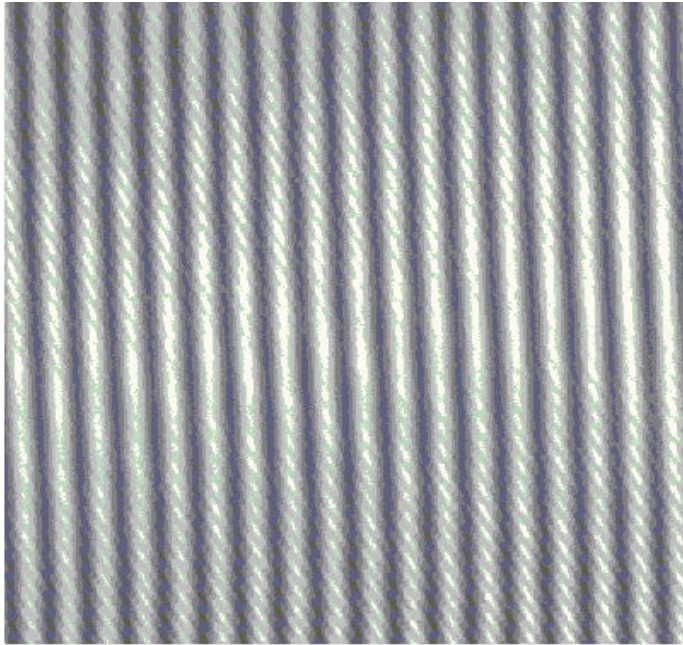
Jako základní stavební kámen byla zvolena laserová dioda o centrální vlnové délce 773nm, která byla přímo navedena do vláknového děliče s poměrem dělení 50:50 na vlnové délce 773nm. Pro propojení optických vláken bylo použito koncovek typu FC/APC. Aby byl zajištěn stejný poměr výkonu na výstupu z optického vlákna, byla zvolena vlákna délky 1m typu PM630-HP.

Jedno ze zakončení optického vlákna bylo připevněno do speciálně zkonstruovaného stojanu. Druhé optické vlákno, vedené nejdříve přes phase shifter, bylo taktéž navedeno a upevněno do obdobného stojanu. Z obou upevněných optických vláken zakončených koncovkou FC/APC v rozmezí mezního úhlu θ vycházelo elektromagnetické záření kuželovitého tvaru.



Obrázek 12: Schéma zapojení phase shifteru

Po nasměrování středu obou signálů do kamery se snímačem CMOS, bylo možné na monitoru kamery pozorovat interferenční pruhy. Nastavení clony je v tomto bodě klíčové pro správný kontrast interferenčních pruhů.



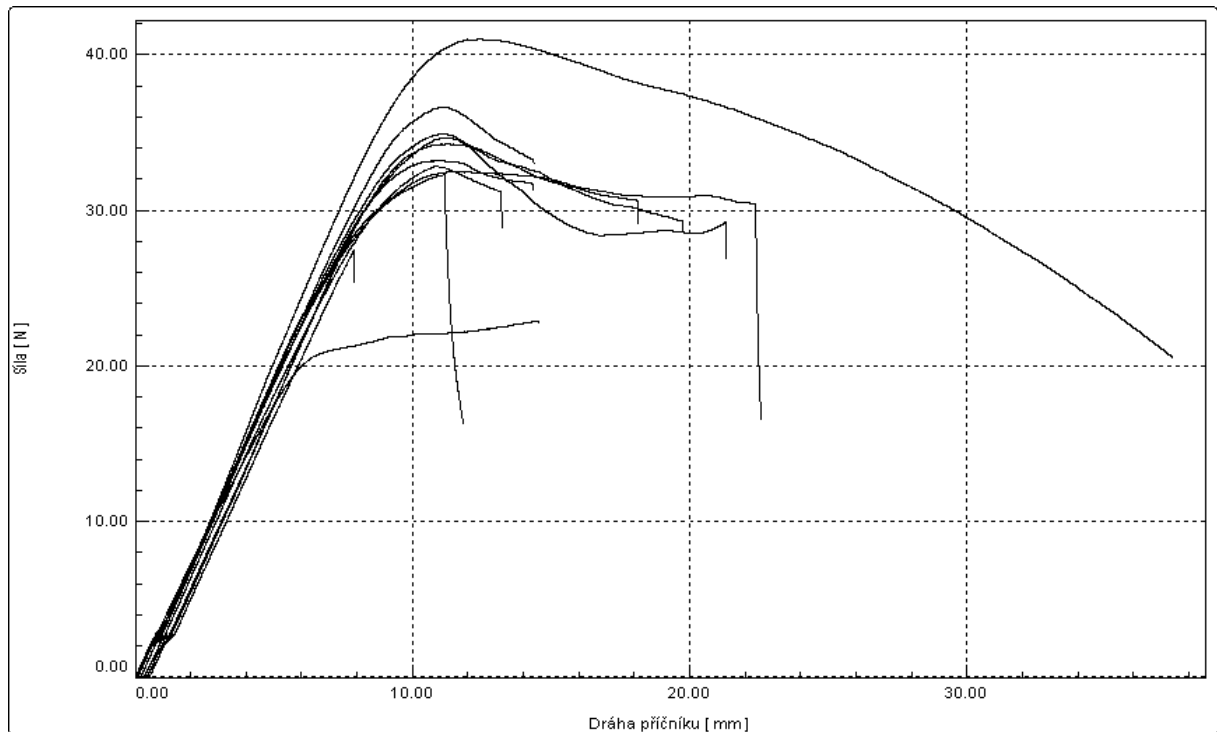
Obrázek 13: Interferenční pruhy ze snímače CMOS

Pro správnou identifikaci posunu fáze je zapotřebí naprosto klidné prostředí okolí v blízkosti phase shifteru. Při sebemenším mechanickém narušení vibracemi (tedy i hlasem), optické vlákno rezonuje a interferenční pruhy se hýbou.

3.9 Trhací testy

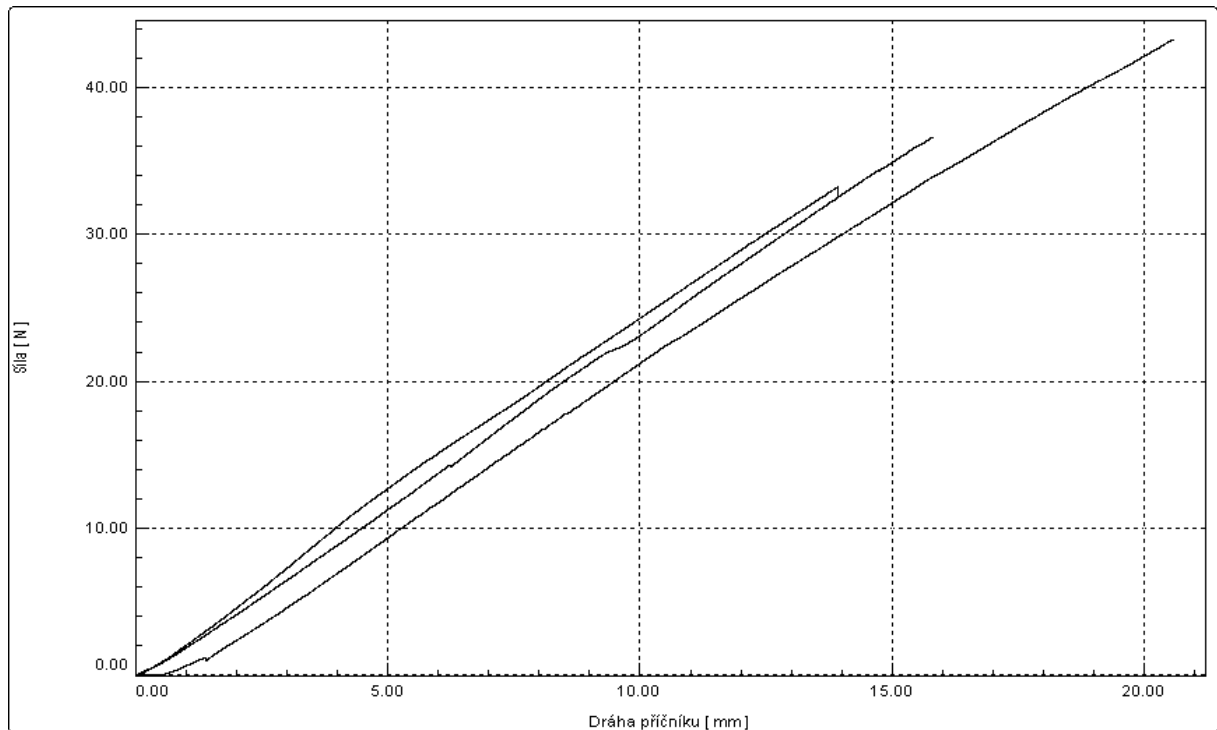
Pro účely zjištění pružnosti a elasticity použitého optického vlákna byly provedeny trhací testy na trhacím stroji Textilní fakulty Technické univerzity v Liberci. Bohužel jsou výsledky z důvodu špatných možností uchycení vlákna do trhacího stroje při větším napětí vlákna neprůkazné, pro naše účely však dostačující.

Hlavním důvodem nezdaru v měření byla veliká míra prokluzu optického vlákna v uchycení trhacího stroje. (Obrázek 14)



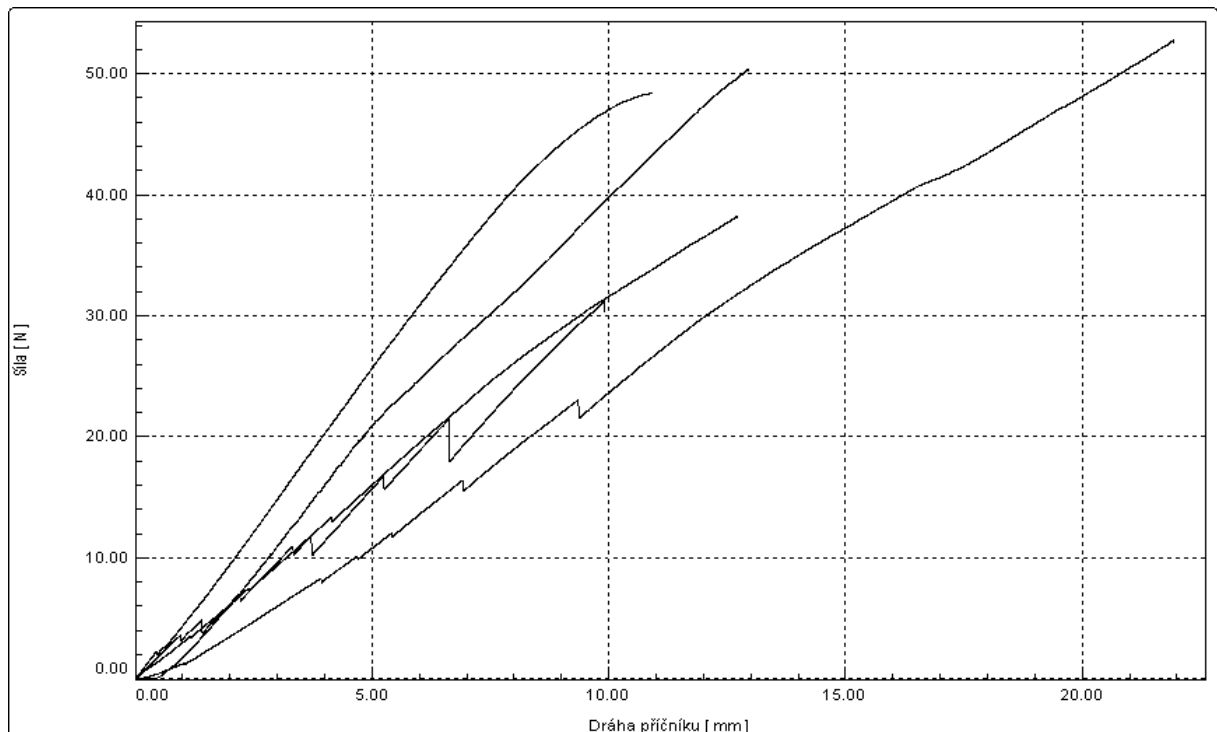
Obrázek 14: Trhací testy vlákna 780HP při délce 10cm - prokluz

K uchycení bylo použito několika metod. Pro účely hrubějšího sevření byly použity například různé typy výstelek čelistí. Nejnadějnější se zdál pokus s přilepením optického vlákna k cívce o průměru 2cm a jeho navinutím na cívku, bohužel však lepidlo částečně naleptalo svrchní akrylový obal vlákna a tudíž praskalo při menších silách, než by bylo schopné vydržet bez poškození claddingu. (Obrázek 15) Z grafu můžeme vidět, že síla potřebná k průtahu vlákna o 6mm je přibližně 20N, poté vlákno začíná prokluzovat. Nicméně nám tento trhací test dává důkaz, že optické vlákno je do určité míry elastické a je vhodné pro použití při stavbě členu.



Obrázek 15: Trhací testy vlákna 780HP při délce 30cm – cívka

Při uchycení optického vlákna na cívce o průměru 2cm vidíme elastickou deformaci až po prasknutí vlákna (Obrázek 15). Z toho můžeme usuzovat, že optické vlákno je vhodné pro stavbu členu.



Obrázek 16: Trhací testy vlákna 630HP - narušení obalu, přilepení

Z Obrázku 16 vidíme, že přilepení vlákna je nevhodné pro použití v členu, jelikož svrchní akrylový obal praská již při síle menší, než 1N.

Jednotky, ve kterých se zdárnější pokusy měření pohybovaly, byly desítky Newtonů a prodloužení cca 1-2% na síle 10 Newtonů.

3.10 Výpočet prodloužení optického vlákna pomocí Hookova zákona

Z důvodu nezdaru při ověření pružnosti optického vlákna trhacími testy bylo na místě si pružnost optického vlákna ověřit alespoň matematicky. Pomocí Hookova zákona definovaného:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

, kde E zastupuje Modul pružnosti materiálu v tahu, σ napětí v tahu a ε relativní deformace:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

kde Δl je prodloužení vzorku a l_0 počáteční délka.

Pomocí jednoduchého vyjádření ε relativní deformace z rovnice Hookova zákona, získáme:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Uvažujme optické vlákno i s obalem o průměru 0,5mm z jednotného materiálu a to z křemíkového skla, potom jeho průřez činí

$$\pi r^2 = 0,25^2 \pi = 0.1963 \text{mm}^2 = 0.1963 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

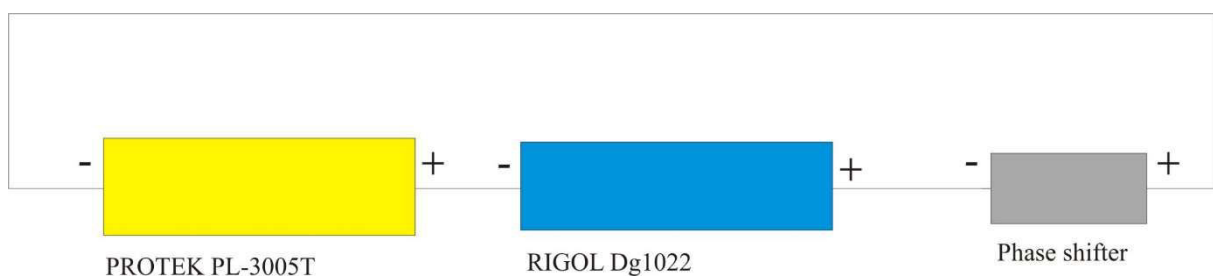
Jednoduchým vyjádřením Δl dostaneme:

$$\Delta l = \frac{l_0 F}{\pi r^2 E} = \frac{0,3 * 30}{0.1963 \times 10^{-6} * 7,2 * 10^{10}} = 0,0006367 \text{m} = 0,64 \text{mm}$$

Je zřejmé, že výpočet je čistě orientační, jelikož vlastnosti jádra, vnitřního obalu i claddingu jsou různorodé. Výpočet nám ale říká, že optické vlákno je možné v rámci milimetrů natáhnout.

3.11 Zapojení phase shifteru v elektrickém obvodu

Pro spolehlivý chod phase shifteru bylo zapotřebí na piezoelektrický člen přivést předpětí, pro předpětí byl použit již zmíněný laboratorní zdroj PROTEK PL-3005T zapojený sériově před funkční generátor RIGOL DG1022, který sériově zapojen na piezoelektrický člen utvářel elektrický obvod.

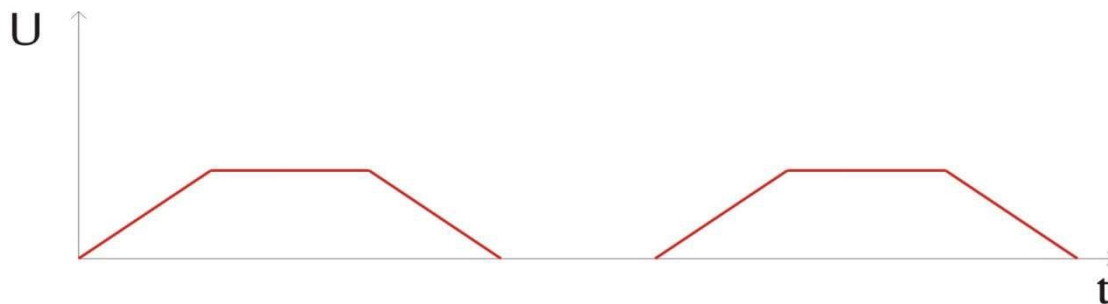


Obrázek 17: Zapojení phase shifteru v elektrickém obvodu

4. Měření posunu fáze

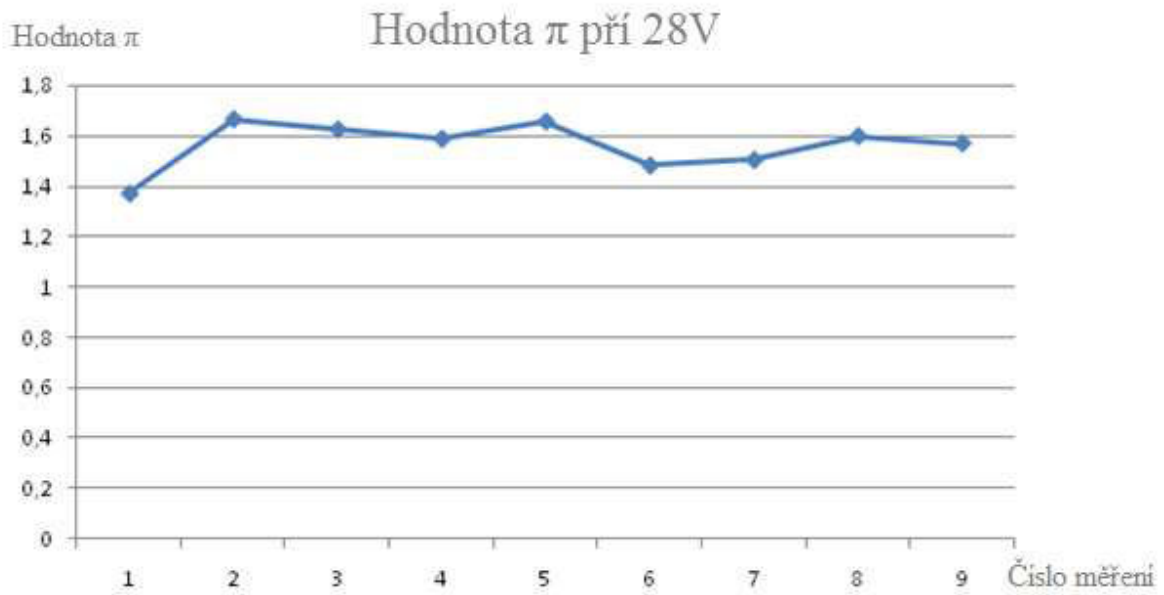
Při posunutí interferenčních pruhů o jednu periodu, tedy pokud se bílý pruh přesune na místo vedlejšího bílého pruhu, víme, že vlákno bylo prodlouženo, či zkráceno o vlnovou délku světla. V momentě, kdy pruhy změni svojí pozici o jednu periodu, optické vlákno se natáhlo, či smrštilo o 773nm. Právě na tomto principu později vyšetřujeme posun optické fáze.

Snažíme se zjistit závislost napětí na prodloužení vlákna, respektive na fázovém posunu. Vyšetřujeme a hledáme místa, kde má určená vertikální linie největší kontrast a kdy má nejmenší. Zvyšujeme a snižujeme napětí pomocí funkce rampa s náběžnou a sestupnou hranou.



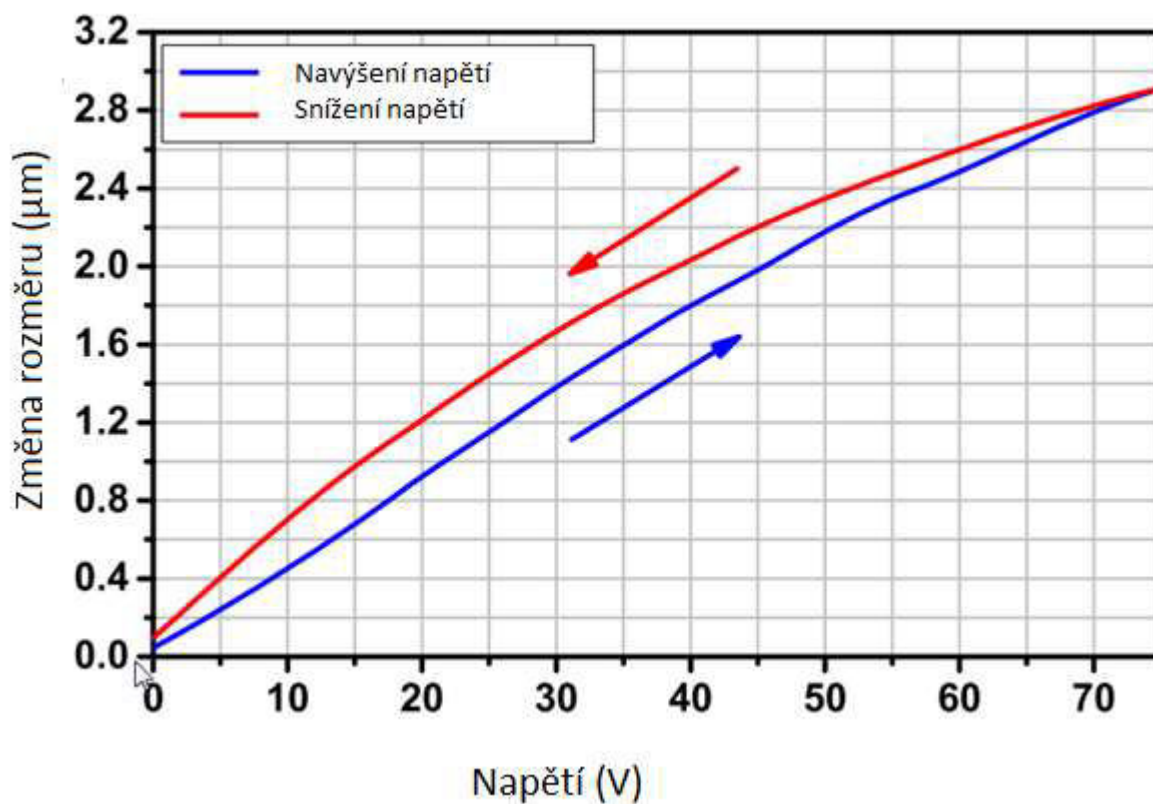
Obrázek 18: Signál vysílaný přístrojem Rigol DG1022

Rigol DG1022 je ovládán přes rozhraní USB. V momentě, kdy součet hodnot kontrastu celé horizontální linie je vyhodnocen jako největší (předchozí a následující krok má součet kontrastů menší), program označí bod jako maximum a uloží dvojici hodnot – Napětí a fázový posun. Nutno podotknout, že prostředí pro vyhodnocení bylo programováno v programovacím prostředí MATLAB.



Obrázek 19: Graf počátečních hodnot PI

Z důvodu nelinearity chodu piezoelektrického členu v mezních oblastech jeho funkčnosti začínáme měřit při hodnotě 28V.



Obrázek 20: Graf závislosti napětí na změně velikosti piezo členu

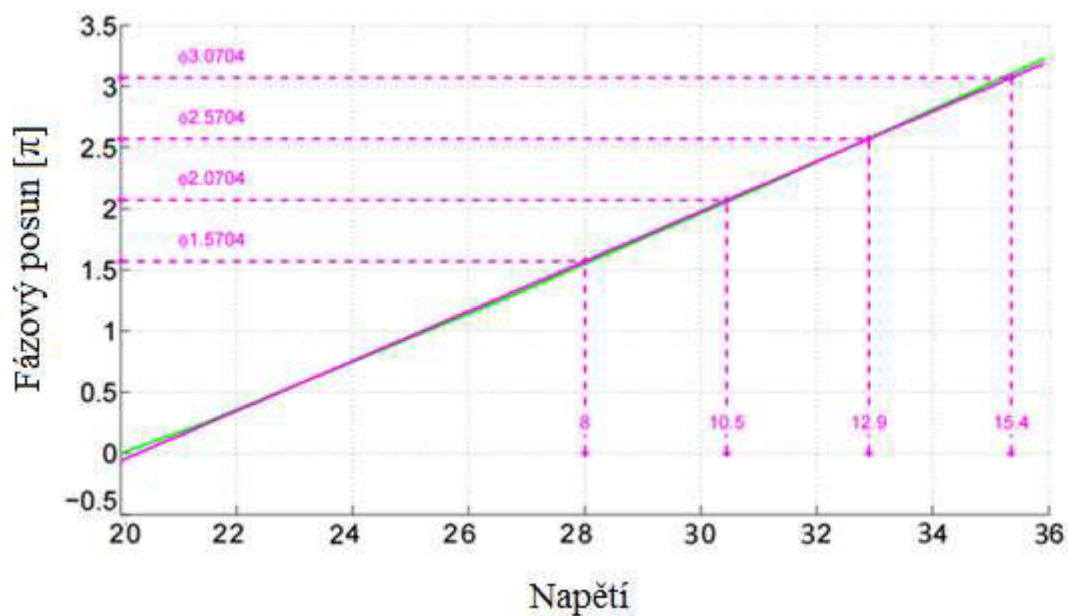
28V pro měření uvažujeme jako startovní pozici, kdy pro každé měření určíme počáteční hodnotu fázového posunu vzhledem k předpjatému stavu (20V) a dále nás bude zajímat pouze rozdíl mezi jednotlivými naměřenými hodnotami.

Z Grafu je možné vidět výchylky hodnoty π při opakování téhož pokusu. Vychýlení od střední hodnoty je pravděpodobně způsobeno prokluzem optického vlákna v uchycení, či hysterezí materiálu optického vlákna.



Obrázek 21: Graf potřebného napětí k fázovému posunu $\pi/2$

Z grafu potřebného napětí k posunutí fáze o $\pi/2$ je vidět, že při jednotlivých měřeních je zapotřebí rozdílných napěťových skoků k určitému posunu fáze. Nutno podotknout, že jednotlivá měření jsou lineární, tudíž k dalšímu kroku posunu o $\pi/2$ je zapotřebí stejného napětí, jako při předchozím kroku.



Obrázek 22: Graf vyhodnocení pokusu střední hodnoty závislosti napětí na posunu fáze

Z grafu střední hodnoty závislosti napětí na posunu fáze vidíme, že závislost přírůstku posunu fáze optického signálu na napětí přivedeném na piezoelektrický člen je v některých oblastech téměř lineární. Z toho usuzujeme, že sestaveným vláknovým členem je možné s fází optického signálu manipulovat.

Z naměřených hodnot vypočteme rovnici regresní přímky metodou nejmenších čtverců:

$$f(x) = 19,7968 + 0,2032x$$

Ze které je vidět, že pro posun fáze o π je zapotřebí změnit napětí cca o 5V

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyvinout přístroj, kterým by zajistil posun fáze světla.

Jako vhodná metoda byla zvolena změna délky dráhy optického signálu za pomoci deformace optického vlákna. Návrh mechanických částí byl vytvořen v programu SolidWorks a zkonstruování bylo realizováno v rámci Regionálního centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC v Turnově. Po osazení phase shifteru piezoelektrickým členem a diferenciálním šroubem bylo zapotřebí sestavit elektrický obvod a zapojit součásti potřebné pro ovládání členu. K těmto účelům bylo použito laboratorního zdroje PROTEK PL-3005T pro přednapětí 20V a generátoru vlny RIGOL DG1022, který je schopen zajistit výstupní napětí s funkcí rampy s náběžnou a seběžnou hranou.

K otestování funkčnosti byl sestaven Huygensuv interferometr, ve kterém byl použit laser o vlnové délce 773nm, vláknový dělič s poměrem 50:50 na vlnové délce 773nm, optický snímač typu CMOS a pro posun fáze vyrobený element pro posun fáze. Jako optické vlákno bylo použito optického vlákna PM630-HP dodaného společností SQS Nová Paka.

Automatizované prostředí pro měření posunu fáze bylo naprogramováno v prostředí MATLAB, ve kterém byla zároveň i vyšetřena a potvrzena linearita chodu členu a závislost velikosti napětí na posunu fáze.

Výsledkem reálného testování je fakt, že phase shifter je schopný fungovat lineárně. Opakovatelnost pokusu je relativní v závislosti na uchycení optického vlákna. Pro dosažení kvalitnějších výsledků je zapotřebí navrhnout robustnější způsob uchycení optického vlákna.

Citovaná literatura

- [1] Bahaa E. A. Saleh, M. C. (1994). *Základy fotoniky 2*. Praha: MatFyz Press.
- [2] Bula, M. (nedatováno). *Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci*. Načteno z Konstrukce vláknového Machova-Zehnderova interferometru se dvěma děliči s proměnnými dělicími poměry.
- [3] Dudely, C. (nedatováno). *Know about interferometry*. Načteno z Slide serve: www.slideserve.com/catherine-dudley/interferometry
- [4] Fojtík, J. (nedatováno). *Perspektivní bezpečnostní technologie ochrany majetku, Univerzita T.Bati ve Zlíně*. Načteno z STUDIE VYUŽÍVÁNÍ OPTICKÉHO PŘENOSU V PKB: <http://www.isc.utb.cz/data/conference/prispevky/Jan.Fojtik@seznam.cz/fojtik.doc>
- [5] Fuka J., H. B. (Praha 1961). *Optika a atomová fyzika, I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy*.
- [6] Horny, V. (10. Prosinec 2014). *CVUT Fifi*. Načteno z Interference a ohyb světla: kfe.fjfi.cvut.cz/~horny/210%20Interference.pdf
- [7] Ing. Ondřej Číp, P. I. (19. 10 2011). *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie*. Načteno z http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf
- [8] Jiráček, M. (9. Prosinec 2014). *Základy aplikované optoelektroniky, Ediční středisko RUP Olomouc, Olomouc, 1990*.
- [9] *Pan Wiki*. (9. Prosinec 2014). Načteno z Optické vlákno: http://panwiki.panska.cz/index.php/Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno
- [10] Rýc, B. J. (2011). *VUT Br, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY*. (Michelsenuv Interferometr) Načteno z Diplomová práce.
- [11] *Stimulovaná emise - Wikipedia*. (23. 10 2013). Získáno 29. 11 2014, z Wikipedia: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise

- [12] *TKC Systems*. (5. prosinec 2014). Načteno z Optické vlákno - TKC systems:
<http://www.tkcsystem.cz/products/opticke-vlakno/>
- [13] *Wikipedia*. (nedatováno). Načteno z Light:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>

