

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



**Interferometrie s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu -
experimentální ověření principu**

Bakalářská práce

Autor:

Studijní program:

Studijní obor:

Forma studia:

Vedoucí práce:

Termín odevzdání práce:

Miroslava Holá

B1701 Fyzika

Optika a optoelektronika

Prezenční

Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.

květen 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: **Interferometrie s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu – experimentální ověření principu** vypracovala samostatně a použila jsem pramenů, které cituji, a uvádím v přiloženém soupisu literatury.

V Olomouci, dne: 10. 5. 2010

Podpis:

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Josefu Lazarovi, Ph.D. za veškerou pomoc, poskytnuté rady, jak z teoretické, tak praktické oblasti a Ing. Zdeňku Buchtovi, Ph.D. za poskytnutou pomoc.

Můj velký dík patří rodičům a všem blízkým za pochopení a podporu při studiu a vypracování bakalářské práce.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora: Miroslava Holá

Název práce: Interferometrie s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu –
experimentální ověření principu

Typ práce: Bakalářská

Pracoviště: Ústav přístrojové techniky AVČR

Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2010

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá laserovou interferometrií a jejím hlavním problémem, kterým je index lomu atmosféry. Popisuje různá řešení tohoto problému a navrhuje nový způsob, kterým by mohl být interferometr s kompenzací vlivu indexu lomu vzduchu. Práce se zaměřuje na experimentální uspořádání tohoto interferometru a na okolnosti ovlivňující rozlišení a přesnost měření. Vysvětluje rozdíl mezi klasickým interferometrem Michelsonova typu a interferometrem s konstantní délkou. Je zaměřena na popis chyb měření, jejich vznik a následné odstranění. Obsahuje výpočty, které ukazují, jak velkých hodnot mohou chyby dosahovat, aby měření bylo správné. Práce popisuje dvě uspořádání interferometru, z nichž se první sestava ukázala jako nepřesná z důvodu optické složitosti. Další sestava byla podstatně zjednodušena, a proto od ní očekáváme pozitivní výsledky.

Klíčová slova: interferometr, index lomu vzduchu, Edlénova rovnice,

Počet stran: 45

Počet příloh: 0

Jazyk: Český

Bibliographical identification:

Author's first name and surname: Miroslava Holá
Title: Interferometry with compensation of the refractive index of air –
experimental proof of principle
Type of thesis: Bachelor's
Department: Institute of Scientific Instruments of the ASCR
Supervisor: Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.
Year of presentation: 2010

Abstract:

This bachelor's thesis deals with laser interferometry and its main problem which is the atmospheric refractive index. It describes various solutions to this problem and suggests a new interferometer capable of compensating for the influence of the refraction index. The thesis focuses on the experimental configuration of this interferometer as well as factors affecting resolution and accuracy of measurement. It explains the difference between the classical Michelson interferometer and the fixed length interferometer. It describes measuring errors, how they arise and how they can subsequently be eliminated. It contains calculations showing the maximum values of errors which do not interfere with precise measurement. It presents two different configurations of the interferometer. While the one has turned out to be optically too complicated and inaccurate, the other has been substantially simplified and is therefore very hopeful.

Keywords: interferometry, refractive index of air, Edlen formula,

Number of pages: 45
Number of appendices: 0
Language: Czech

Obsah

1.	ÚVOD.....	8
2.	CÍL PRÁCE	9
3.	LITERÁRNÍ PŘEHLED	10
3.1	Princip superpozice	10
3.2	Interference světla	10
3.2.1	Výsledek interference světla	11
3.2.2	Newtonova skla.....	12
3.3	Interferometry	13
3.3.1	Interferenční komparátory	14
3.3.1.1	Michelsonův interferometr	14
3.3.2	Interferenční refraktometry	14
3.3.2.1	Jaminův interferometr	14
3.3.3	Interferenční spektroskopy	15
3.3.3.1	Fabry-Perotův interferometr	15
3.4	Koherence záření.....	16
3.4.1	Koherence časová	16
3.4.1.1	Koherenční délka.....	17
3.4.2	Prostorová koherence.....	17
3.4.2.1	Koherenční plocha.....	18
3.5	Laser.....	18
3.5.1	Spontánní emise.....	18
3.5.2	Stimulovaná emise.....	19
3.5.3	Princip činnosti laseru.....	19
3.6	Index lomu	20
3.7	Interferometrie.....	21
3.7.1	Hlavní problém interferometrie	21
3.7.2	Návrhy řešení problému.....	22
4.	MATERIÁL A METODY ZPRACOVÁNÍ.....	24
4.1	Hlavní rozdíl.....	24
4.2	Interferometr s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu.....	25
4.3	Chyby interferometru	26
4.3.1	Kosinová chyba.....	27

4.3.2	Abbeho chyba	27
4.4	Výpočet velikosti chyb.....	28
4.5	Čtyřkvadrantní detektor (4Q detektor).....	30
4.6	Interferometrická jednotka	31
4.6.1	Eliminace kosinové chyby u jednotky dvěma průchody	31
4.6.2	Eliminace úhlové odchyly zrcadla (Abbeho chyba) u jednotky s dvěma průchody	32
4.7	Nová konfigurace	33
4.7.1	Nová konfigurace – eliminace chyb	34
4.8	Termostatická skříň.....	36
5.	VÝSLEDKY PRÁCE A DISKUSE	37
5.1	Test termostatické skříňe.....	37
5.2	Ověření činnosti interferometru	38
6.	ZÁVĚR.....	41
7.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	42
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	43

1. ÚVOD

Hlavním cílem projektu je vyvinout interferometrický systém pro měření polohy s přímou kompenzací vlivu fluktuací indexu lomu vzduchu v rozsahu měření a ověřit schopnost potlačit index lomu související s nejistotami atmosféry při interferometrickém měření.

Hlavní představa kompenzovaného interferometru je založena na systému, kde vlnová délka laserového zdroje není odvozena od optické frekvence stabilizovaného laseru, ale od pevné mechanické délky, která je základní deskou nebo kostrou celého interferometrického systému.

Sestava se skládá ze dvou interferometrů Michelsonova typu, které jsou potřebné k získání dvou zdrojů dat. Jeden se vztahuje k určení polohy a druhý k proměnné optické délce. Oba interferometry jsou zásobeny z jednoho laserového zdroje a laserové svazky, které se odráží od zrcadla, mají za následek růst vzdálenosti prvního interferometru a klesání vzdálenosti druhého interferometru. V případě konstantního indexu lomu prostředí součet těchto výstupů z dvou interferometrů zůstává konstantní. Tento součet hodnota je použit k určení optické frekvence laserového zdroje.

Celý systém bude testován a srovnáván se současnými refraktometry a interferometry a index lomu prostředí bude srovnáván s Edlénovou rovnicí. Kalibrace a porovnávání probíhá v laboratorních podmínkách, kde turbulence vzduchu a teplotní výkyvy jsou potlačeny. Omezujícím faktorem je stabilita referenční měřicí délky a její nízká citlivost na hlavní veličiny ovlivňující index lomu vzduchu. Chyby budou porovnávány refraktometry.

Systém může najít široké uplatnění v metrologii, nanotechnologii, průmyslu a v mnoha dalších oborech.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce je obeznámit se s laserovou interferometrií pro měření délek, se základními principy a okolnostmi ovlivňující rozlišení a přesnost. Dále připravit experimentální uspořádání pro ověření funkce interferometru s kompenzací vlivu fluktuací indexu lomu vzduchu, který je založen na diferenčním uspořádání a odvodit stabilizovanou vlnovou délku ve vzduchu od mechanické délky referenčního etalonu vyrobeného z materiálu s malou teplotní roztažností. Závěrem provést měření ověřující funkci sestavy a konfrontovat dosažené výsledky se stanovením indexu lomu vzduchu prostřednictvím Edlenovy formule.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 Princip superpozice

Šíření světla v prostředí popisují Maxwellovy rovnice s příslušnými materiálovými vztahy. Pokud je prostředí takové, že materiálové vztahy jsou lineární, jsou rovnice popisující šíření světla lineární a platí princip superpozice. To znamená, že pokud jsou elektrické pole \vec{E}_1, \vec{E}_2 řešením Maxwellových rovnic pro dané prostředí, je řešením také $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Například laserový svazek se nezmění, když se zapne druhý svazek, který se s prvním kříží. Tento princip platí ovšem pro libovolný počet polí. Jsou-li $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4, \vec{E}_5, \dots$ řešenými vlnové rovnice, je řešením i jejich suma

$$\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k.$$

Princip superpozice neplatí obecně při šíření optických vln v nelineárních prostředích (Malý, 2008).

3.2 Interference světla

Interference světla je souhrn jevů souvisejících se skládáním světla. K interferenci může dojít při skládání dvou nebo více vln od diskrétních zdrojů. Interference je výsledkem principu superpozice, který vyplývá z linearitity Maxwellových rovnic, je projevem vlnové podstaty světla a je pozorovatelná jen tehdy, pokud jsou skládané vlny koherentní (Bouchal, 2010).

Z principu superpozice vyplývá, že pokud jsou jednotlivá světelná pole řešením vlnové rovnice, je řešením i jejich součet. Jestliže se v prostoru setkávají dvě světelné vlny $\vec{E}_1(\vec{r}, t), \vec{E}_2(\vec{r}, t)$, je výsledné pole dáno součtem

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t).$$

Okem a detektory zaznamenáváme intenzitu světla, která je dána výrazem

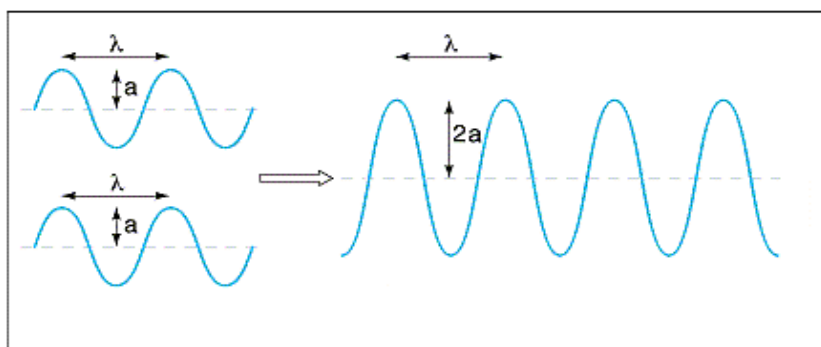
$$I(\vec{r}) = \langle S(\vec{r}, t) \rangle = \frac{1}{Z} \langle E^2(\vec{r}, t) \rangle = \frac{1}{Z} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} E^2(\vec{r}, t) dt.$$

To ovšem neznamená, že odpovídají-li zmíněným dvěma světelným polím intenzity I_1 a I_2 , není obecně výsledná intenzita I rovna součtu jednotlivých intenzit. Ukazuje se naopak, že v určitých místech může být intenzita větší než součet, jinde menší nebo dokonce nulová. Jevy, v nichž skládání dvou nebo více polí vede k prostorové modulaci intenzity výsledného pole, se nazývají interferenční jevy (Malý, 2008).

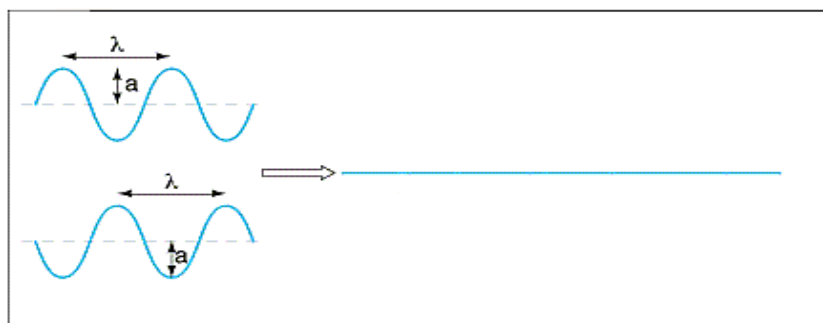
Interference má bohaté uplatnění jak ve vědě, tak i v technice. Pomocí interference se kontroluje leštění čoček, zkouší se objektivy, zjišťuje se rovinnost desek při leštění, měří se tloušťka tenkých destiček, určuje se koeficient tepelné roztažnosti, stanoví se tepelné změny indexu lomu atd. Interferencí se provádí měření vlnových délek, studuje se jemná struktura spektrálních čar. Na interferenci jsou dále založeny technicky významné protiodrazové vrstvy a interferenční filtry (Fuka, Havelka, 1961).

3.2.1 Výsledek interference světla

Výsledek interference závisí na tom, jak jsou navzájem posunuta obě vlnění, jaký je mezi nimi fázový rozdíl. Je-li fázový rozdíl roven sudým násobkům půlvln $\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}$, vlnění se setkávají se stejnou fází, výsledná intenzita osvětlení se zesílí, vznikají maxima a dochází k tzv. konstruktivní interferenci (obr. 1). Je-li dráhový rozdíl roven lichým násobkům půlvln $\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$, vlnění se setkávají s opačnou fází, výsledná intenzita se ruší a vznikají minima a dochází k tzv. destruktivní interferenci (obr. 2) (Jexová, 2008).



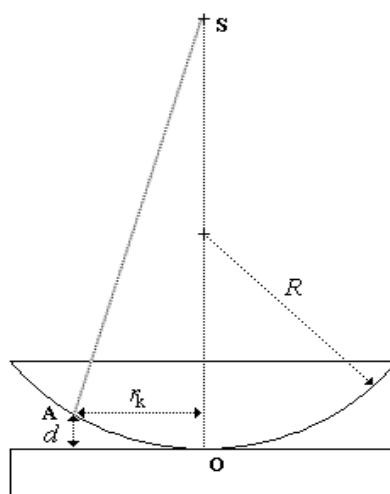
Obr. 1: Konstruktivní interference



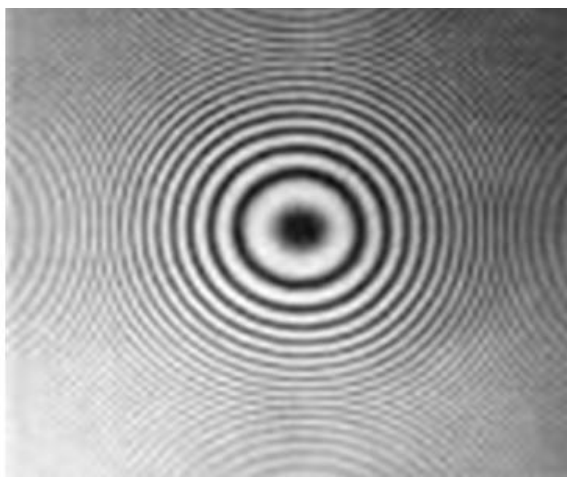
Obr. 2: *Destruktivní interference*

3.2.2 Newtonova skla

Newtonova skla je jednoduché zařízení, kterým lze pozorovat interferenci v odraženém i prošlém světle a měřit vlnovou délku světla. Newtonova skla jsou tvořena skleněnou deskou s rovnoběžnými rovinnými plochami (tzv. planoparalelní deska), k níž je přiložena plankonvexní čočka (obr. 3) (tj. čočka, jejíž jedna plocha je rovinná, druhá kulová). Kulová plocha má velký poloměr křivosti R . V okolí místa dotyku čočky s destičkou vzniká tenká vzduchová vrstvička, jejíž tloušťka se mění pomocí přítlaku čočky ke skleněné desce. Při dopadu světla dochází k interferenci světla odraženého od obou rozhraní vzduchové vrstvy. Interferenční obrazec monochromatického světla má podobu světlých a tmavých kroužků, kterým se říká Newtonovy kroužky (obr. 4). Při použití bílého světla vznikají Newtonovy kroužky duhových barev (obr. 5) (Anonym 1, 2010).



Obr. 3: *Newtonova skla*



Obr. 4: *Interference monochromatického světla*



Obr. 5: *Interference bílého světla*

3.3 Interferometry

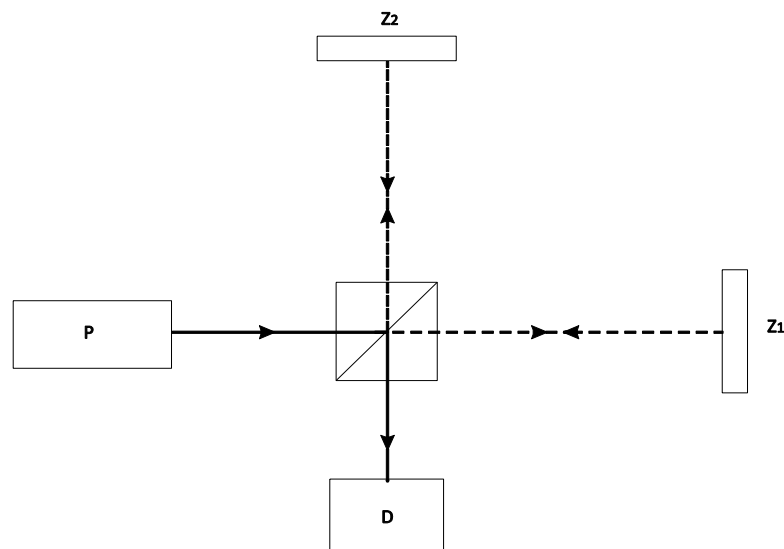
Interferometry jsou přístroje určené k různým účelům, nejčastěji se využívají pro velmi přesná měření, jejíž princip je založen na interferenci světla. Dělí se na tři druhy: přístroje k měření délek zvané *interferenční komparátory* (Michelsonův), přístroje, jejichž účelem je stanovit relativní změny rychlosti a tak určit změny indexu lomu plynů nebo kapalin – *interferenční refraktometry* (Rayleighův, Mach-Zahnderův, Jaminův), a přístroje k určení jemné struktury spektrálních čar, jež se nazývají *interferenční spektroskopy* (Fabry-Perotův, Fizeaův) atd. (Fuka, Havelka, 1961).

3.3.1 Interferenční komparátory

3.3.1.1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je dvousvazkový interferometr, který byl zkonstruován Albertem Michelsonem v roce 1881 (obr. 6) (Malý, 2008).

Michelsonův interferometr se skládá ze zdroje záření P (např.: He-Ne laser), dělicího hranolu, zrcadel Z_1 , Z_2 a detektoru D . Světlo ze zdroje P dopadána na dělicí hranol, v něm se rozdělí na dva svazky stejné intenzity, referenční a měřící. Měřící svazek pochází dělicím hranolem, dopadá na pohyblivé zrcadlo Z_1 a od něj se odráží zpět. Referenční svazek se v dělicím hranolu odráží kolmo, dopadá na pevné zrcadlo Z_2 a od něj se odráží zpět. Svazky se opět setkávají v dělicím hranolu a vystupují ven směrem na detektor D . Svazky se ovšem setkávají se vzájemným fázovým zpožděním, které odpovídá rozdílu optických drah obou svazků (Malý, 2008).



Obr. 6: Michelsonův interferometr

3.3.2 Interferenční refraktometry

3.3.2.1 Jaminův interferometr

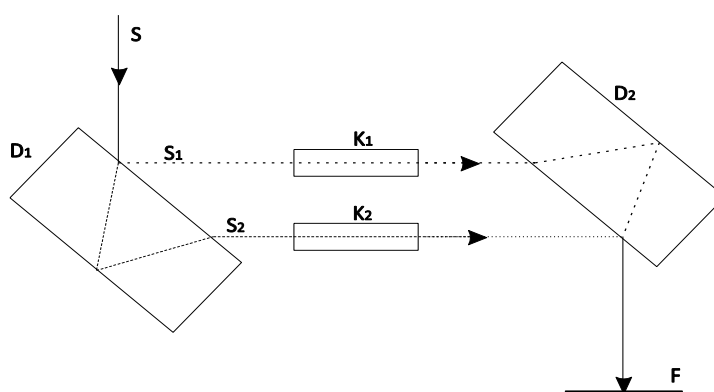
Jaminův interferometr je přístroj určený k měření refrakce (indexu lomu) plynů na základě pozorování interferencí dvou svazků (obr. 7).

Svazek S paprsků monochromatického záření se dělí pomocí planparalelní desky D_1 na svazky S_1 a S_2 procházející stejnými kyvetami K_1 a K_2 naplněnými měřeným plynem. Planparalelní deskou D_2 se svazky odrážejí směrem k detektoru F . Desky D_1 a D_2 nejsou přesně planparalelní, a proto je možné v rovině pozorovat interferenční proužky stejného sklonu.

Během experimentu se jedna z kyvet odčerpá a pozoruje se posuv interferenčních maxim. Při posuvu o m maxim je odchylka indexu lomu plynu od indexu lomu vakua

$$\Delta n = \frac{m\lambda}{l},$$

kde λ je vlnová délka záření, l délky kyvety. Přesnost měření Δn je velmi vysoká (Vrbová, et al. 1994).



Obr. 7: Jaminův interferometr

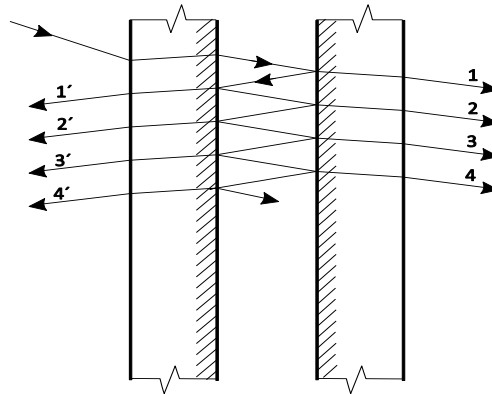
3.3.3 Interferenční spektroskopy

3.3.3.1 Fabry-Perotův interferometr

Fabry- Perotův interferometr je optický systém tvořený dvěma rovnoběžnými, zpravidla skleněnými deskami, ve kterém dochází k mnohosvazkovému odrazu a mnohosvazkové interferenci (obr. 8).

Na povrch desek vzájemně k sobě převrácených bývají nanášeny tenké polopropustné vrstvy zrcadlicího kovu. Vnější plochy bývají někdy opatřeny antireflexní vrstvou. Dopadá-li na soustavu monochromatické záření ve tvaru rovinné vlny, dochází na rozhraní k odrazu a lomu. Procházející a odražené záření je záření složené z posloupnosti

zpožděných rovinných vln. Intenzita záření prošlého a odraženého závisí na vzdálenosti desek, vlnové délce a úhlu dopadu záření (Vrbová, et al. 1994).



Obr. 8: *Fabry-Perotův interferometr*

3.4 Koherence záření

Mnohé optické měřicí metody vyžadují pro svou funkci kvalitní zdroje záření. Důležitým parametrem kvality zdroje záření pro interferometrii, holografii, ale i pro jiné optické měřicí metody je koherence záření. Za koherentní zdroje lze považovat takové, jejichž frekvence záření je stále stejná a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. V literatuře se uvádí tzv. komplexní stupeň koherence, který zahrnuje koherenci časovou a koherenci prostorovou. Zlepšení koherenčních vlastností lze dosáhnout zvýšením monochromatickosti a ohraničením velikosti zářící plochy zdroje. Monochromatickost záření ovlivňuje koherenci časovou a velikost zářící plochy zdroje ovlivňuje koherenci prostorovou (Anonym 2, 2010).

3.4.1 Koherence časová

Koherence časová je statistická závislost mezi veličinami charakterizující optické záření v jistém bodu prostoru a v různých časových okamžicích. Mírou časové koherence je stupeň koherence druhého řádu $\gamma(\mathbf{r}, t_1; \mathbf{r}, t_2)$, kde \mathbf{r} je polohový vektor zvoleného bodu prostoru, t_1, t_2 jsou časové okamžiky pozorování. Ve zvláštním případě, když pole můžeme

považovat za stacionární náhodný proces, je $\gamma(\mathbf{r}, t_1; \mathbf{r}, t_2 + \tau)$ funkcí jen časového zpoždění τ , tj. nezávisí na volbě počátku odečítání času t_1 . Mírou časové koherence je tzv. koherenční doba, tj. takový interval τ , během kterého je záření v daném bodě statisticky vázáno a signál složený z původního a zpožděného signálu vykazuje interferenci. Časová koherence souvisí se šířkou spektrální čáry. Příkladem záření s maximální časovou koherencí je záření ideálního jednobodového laseru, naopak příkladem nekoherentního záření je bílé světlo (Vrbová, et al. 1994).

3.4.1.1 Koherenční délka

Koherenční délka je největší dráhový rozdíl, při kterém jsou ještě pozorovatelné interference v poli dvou optických svazků vzniklých dělením jednoho svazku a šířících se pak po určitých drahách.

Koherenční délka může být měřena užitím Michelsonova interferometru a je dána rozdílem optické dráhy laserového svazku interferujícího se sebou samým při $1/e = 37\%$ kontrastu (visibilitě) interference, který je definován pomocí $V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$, kde I je intenzita. Koherenční délka je mírou časové koherence (Anonym 3, 2010).

3.4.2 Prostorová koherence

Prostorová koherence je statistická závislost mezi veličinami charakterizujícími optické záření v jistém časovém okamžiku v různých bodech prostoru viz. Youngův dvouštěrbinový experiment. Měřítkem prostorové koherence je stupeň koherence druhého řádu $\gamma(\mathbf{r}_1, t, \mathbf{r}_2, t)$, kde t je okamžik pozorování a $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ jsou polohové vektory bodů pozorování. Ve stacionárním případě $\gamma(\mathbf{r}_1, t, \mathbf{r}_2, t)$ nezávisí na čase. Mírou prostorové koherence je koherenční plocha. V procesu šíření optického záření (i volným prostorem) dochází ke zvyšování prostorové koherence. Příkladem záření s maximální prostorovou koherencí je výstupní svazek ideálního jednobodového laseru naopak příkladem prostorově nekoherentního záření je záření hvězdy nebo výbojky přímo na jejím povrchu (Vrbová, et al. 1994).

3.4.2.1 Koherenční plocha

Koherenční plocha je plocha, která je mírou prostorové koherence optického záření. Je-li např. r_1 pevně zvolený bod v jisté rovině, potom koherenční plocha je množina bodů r_2 téže roviny, pro které je modul stupně koherence $\gamma(r_1, t; r_2, t)$ výrazně odlišný od nuly. Vzorkujeme-li signál dvěma štěrbinami umístěnými v bodech s polohovými vektory r_1, r_2 uvnitř koherenční plochy, budou mít interferenční obrazce dostatečně velký kontrast.

Ideální laser pracující s jediným příčným modem vyzařuje rovinnou nebo sférickou vlnu a má koherenční plochu nekonečně velkou. Koherenční plocha na povrchu chaotického zdroje záření je nulová. Provádí-li se měření v daleké zóně ve vzdálenosti r od chaotického zdroje kvazimonochromatického záření o střední vlnové délce λ a ploše S , je koherenční plocha rovna $(\lambda r)^2/S$ (Vrbová, et al. 1994).

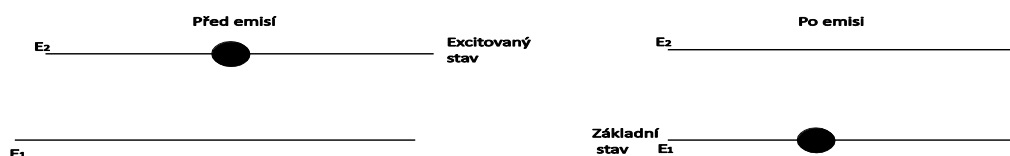
3.5 Laser

Laser znamená *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, neboli „zesílení světla stimulovanou emisí“. První laser byl sestaven v roce 1960 v USA (T. H. Maiman, jednalo se o rubínový laser) (Malý, 2008).

Laser má široké uplatnění v praxi. Využívá se v průmyslu k obrábění materiálu (vrtání, řezání), svařování kovů, zaměřování a měření vzdáleností atd. Lasery se také využívají v medicíně a to například v chirurgii, oftalmologii, dermatologii, stomatologii atd. Laser má široké uplatnění i ve vojenských aplikacích, jaderné fyzice, ekologii, astronomii apod. (Anonym 4, 2010).

3.5.1 Spontánní emise

Spontánní emise je samovolné vyzařování elektromagnetického pole vzbuzenými kvantovými částicemi (atomy, ionty, molekulami apod.). Na rozdíl od stimulované emise při spontánní emisi není nezbytná přítomnost vnějšího elektromagnetického pole. Vzbuzená částice přechází z vyšší energetické hladiny E_2 na hladinu s nižší energií E_1 samovolně a přitom vyzařuje elektromagnetické záření s frekvencí $\nu = (E_2 - E_1)/h$, tj. rezonanční záření (Vrbová, et al. 1994). Ze základního stavu se do excitovaného stavu atom může dostat například působením optického záření, elektrickým výbojem nebo chemickou reakcí (obr. 9) (Bouchal, 2010).



Obr. 9: *Spontánní emise*

3.5.2 Stimulovaná emise

Stimulovaná emise je kvantový jev, při kterém dopadající foton stimuluje přechod excitovaného elektronu do základního stavu. V excitovaném stavu setrvává elektron jen velmi krátkou dobu 10^{-3} - 10^{-7} s. Je-li jeho přechod na základní hladinu vyvolán (stimulován) fotonem o energii, která odpovídá rozdílu energií hladin, pak foton, který je při přechodu vyzářen, má stejnou vlnovou délku (energii), polarizaci a směr jako foton stimulující (obr. 10) (Bouchal, 2010).



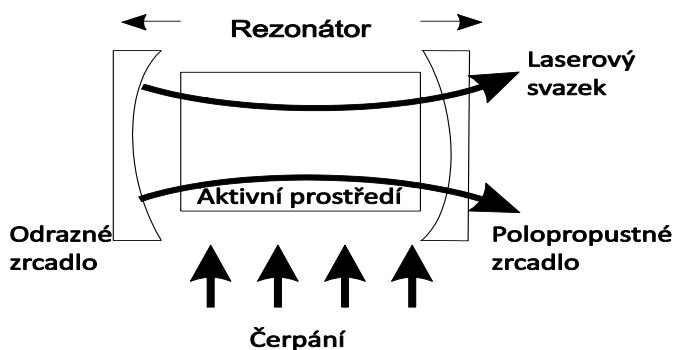
Obr. 10: *Stimulovaná emise*

3.5.3 Princip činnosti laseru

Laser se skládá z aktivního prostředí, jímž může být pevná látka (krystal, sklo, polovodič), plyn nebo směs plynů, kapalina, optického rezonátoru tvořeného zpravidla dvěma nebo více zrcadly, z nichž alespoň jedno je polopropustné a slouží k vývodu energie, a zdroje budící energie, jímž může být např. výbojka, proud elektronů nebo i chemická reakce (obr. 11) (Vrbová, et al. 1994).

Po zapnutí laseru začne působit zdroj čerpání, například výbojka osvětluje aktivní prostředí, ve kterém vznikne inverze populace. Jakmile je populována vyšší hladina, vyzařuje aktivní prostředí fotony spontánní emisí. Spontánně excitované fotony při šíření prostředím mohou vyvolávat stimulované přechody, dochází k („lavinovému“) zesílení světla. Světlo, které se šíří mimo zrcadla rezonátoru, odchází, naproti tomu světlo, šířící se ve směru osy optického rezonátoru se od zrcadel odráží a může mezi zrcadly obíhat. Při svých obězích je v aktivním prostředí zesilováno (Malý, 2008).

Laser vydává světlo, které je monochromatické, koherentní a má malou divergenci.



Obr. 11: Schéma laseru

3.6 Index lomu

Index lomu (značí se n nebo N) je bezrozměrná veličina popisující šíření světla v látkách. V nejjednodušším případě – pro průhledné a čiré látky – lze index lomu n považovat za konstantu, vztahující se k celému rozsahu viditelného světla. V tom případě je index lomu vždy větší než 1 a rychlost šíření světla v dané látce v je určena vztahem

$$v = \frac{c}{n},$$

kde c je rychlost světla ve vakuu. Takto definovaný index lomu se označuje jako absolutní index lomu.

Pro přechod z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 se často používá relativní index lomu n_{21} , který je definován jako

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Máme-li dvě prostředí, pak prostředí s větším absolutním indexem lomu se nazývá opticky hustší, a prostředí s menším absolutním indexem lomu se nazývá opticky řidší prostředí. Při přechodu z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího je relativní index lomu menší než jedna. Naopak při přechodu z prostředí opticky řidšího prostředí do prostředí opticky hustšího je relativní index lomu větší než jedna (Anonym 5, 2010).

Pokud uvažujeme závislost rychlosti na relativní permitivitě prostředí ϵ_r , můžeme index lomu také popsat vztahem

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}.$$

Tento vztah vychází ze závěru Maxwellovy teorie, v níž je konstanta ε_r nezávislá na frekvenci.

3.7 Interferometrie

Interferometrie je přesná měřicí metoda na měření délky a změny vzdáleností. Princip této měřicí metody je založen na interferenci světla. Využívá se v metrologii, v obráběcích strojích, při nejpřesnějším řízení polohy při výrobě mikroelektroniky atd.

3.7.1 Hlavní problém interferometrie

Hlavním problémem při interferometrickém měření je vzduch a to jeho index lomu. Měření je zatíženo jeho hodnotou a variacemi způsobenými turbulencí vzduchu. Index lomu ovlivňuje vlnovou délku

$$n = \frac{\lambda_{vakua}}{\lambda_{prost\ \text{ředí}}}$$

Vlnová délka měřená ve vakuu je větší než vlnová délka měřená ve vzduchu.

V případě měření se standardními interferometrickými systémy je index lomu vzduchu nahrazen atmosférickými parametry – teplotou T , tlakem P , vlhkostí vzduchu RH a v některých případech i koncentrací oxidu uhličitého (CO_2). Hodnota indexu lomu je poté vypočtena z Edlénovy rovnice

$$n = 1 + (3,8369 \cdot 10^{-7} \cdot P) \left[\frac{1 + P \cdot (0,817 - 0,0133 \cdot T) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03661 \cdot T} \right] - 5,607943 \cdot 10^{-8} \cdot f$$

$$f = \frac{RH}{100} \cdot [4,07859739 + 0,44301857 \cdot T + 0,00232093 \cdot T^2 + 0,00045785 \cdot T^3]$$

$$n = 3,836391 \cdot P \left[\frac{1 + P \cdot (0,817 - 0,0133 \cdot T) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03661 \cdot T} \right] - 3,033 \cdot 10^{-3} \cdot RH \cdot e^{0,057627 T}.$$

Přesnost takového měření a výpočtu je v řádech 10^{-6} , což je celkem nízká hodnota s porovnáním k vzájemným stabilitám moderních laserových měřidel, které jsou okolo 10^{-13} (Nd: YAG jodinový laser) nebo ještě lepší. V laboratorním prostředí, kde se provádí kalibrování a porovnávání interferometrů, je používán refraktometr.

Všechna měření indexu lomu vzduchu, která jsou provedena refraktometrem nebo výpočtem z Edlénovy rovnice jsou limitována fluktuacemi vzduchu podél a v okolí laserového paprsku. Mimo to jsou teplotní gradienty vzduchu především ve svislé poloze. Tepelné senzory, které se při měření využívají, se umísťují do blízkosti svazku a měří jen v určitých bodech.

Měření indexu lomu pomocí refraktometrie je prováděno s přesností 10^{-7} - 10^{-8} , 10^{-8} se zdá být limitem pro určení indexu lomu vzduchu v laboratorních podmínkách a to z důvodu teplotních gradientů a fluktuací vzduchu.

3.7.2 Návrhy řešení problému

Snaha spojit měřicí vzdálenost interferometru a refraktometru do jednoho celku, který by vypočítal index lomu vzduchu během měření nebo ho přímo nahradil, existuje již delší dobu. Byla provedena a představena již řada různých návrhů.

Článek „Self-Compensated Heterodyne Laser Interferometer“ prezentuje novou techniku pro eliminaci vlivu indexu lomu vzduchu při použití heterodyního laserového interferometru. Sestava se skládá ze dvou interferometrů, které určují hodnotu indexu lomu vzduchu. Zaznamenané výsledky ukázaly, že statická chyba systému je $0,02\mu\text{m}$ po 12 hodinách, měření bylo provedeno i na komerčně dostupných laserových systémech a naměřená chyba byla $0,05\mu\text{m}$ po 12 hodinách (Ngoi, Chin, 2000).

Tento systém může nahradit index lomu vzduchu, ale nemůže překonat problém určení indexu lomu v ose laserového paprsku.

Článek „High-accuracy length-measuring interferometer using the two-colour method of compensating for the refractive index of air“ se opět zabývá kompenzací indexu lomu vzduchu při interferometrickém měření a geometrickou délkou. Měřicí systém využívá interferometru s dvěma oddělenými vlnovými délkami λ_1 (zelená), λ_2 (infračervené záření) generovanými Nd: YAG laserem. Z naměřených hodnot vyplývá, že tato metoda „Two-colour method“ se s Edlénovou metodou shoduje s přesností 2×10^{-7} (Matsumoto, Honda, 1992).

Další metoda je navržena v článku „Interferometrische Wegmessung mit automatischer Brechzahlkompensation“, opět se zabývá kompenzací indexu lomu vzduchu.

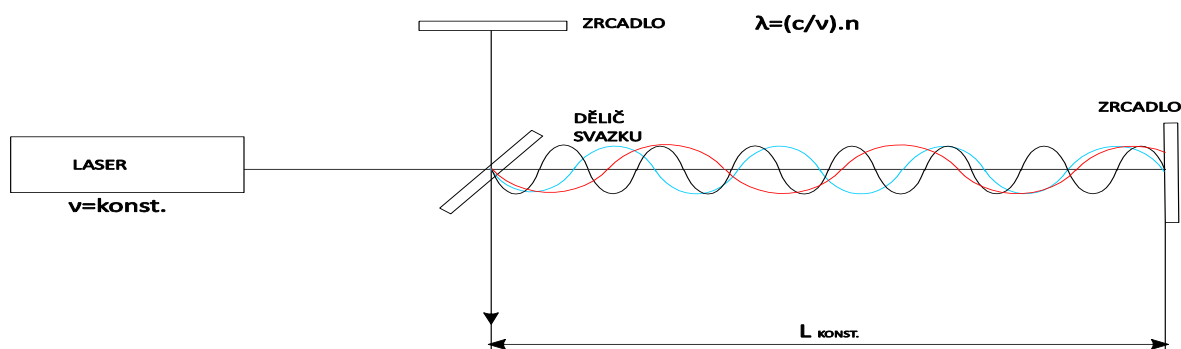
Tato metoda dává do souvislosti vlnovou délku laserového zdroje a mechanickou délku nějakého rámu. Měřicí sestava se skládá ze dvou identických interferometrů. Jeden z interferometrů je fixovaný, nedochází ke změně vzdáleností. Z naměřených hodnot vyplývá nejistota $\pm 5 \times 10^{-7}$ (Höfter, et al. 1990)

4. MATERIÁL A METODY ZPRACOVÁNÍ

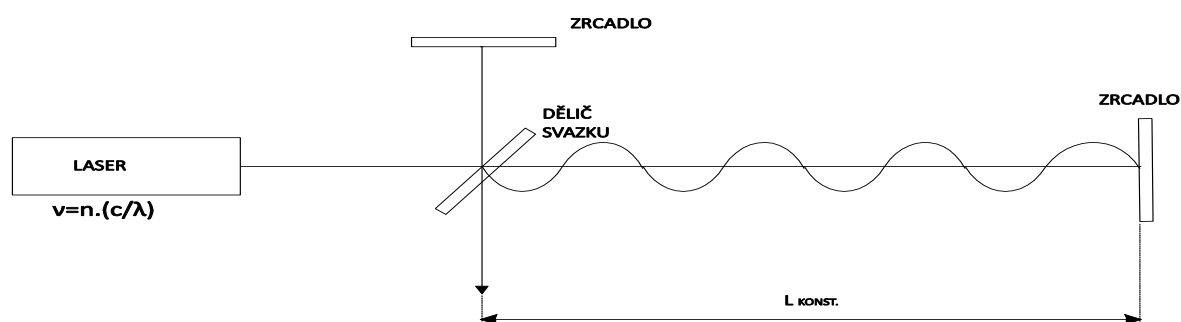
4.1 Hlavní rozdíl

Na (obr. 12) je znázorněn klasický princip interferometru, kde vlnová délka laserového zdroje je přímo úměrná rychlosti světla, indexu lomu daného prostředí a nepřímo úměrná optické frekvenci. Optická frekvence laserového zdroje je konstantní. Je-li délka měřicího ramene konstantní, mění se vlnová délka se změnou indexu lomu,

Na (obr. 13) je znázorněn interferometr s konstantní délkou měřicího ramene, kde optická frekvence laserového zdroje není stálá, ale je přímo úměrná rychlosti světla a nepřímo úměrná vlnové délce.



Obr. 12: Princip interferometru



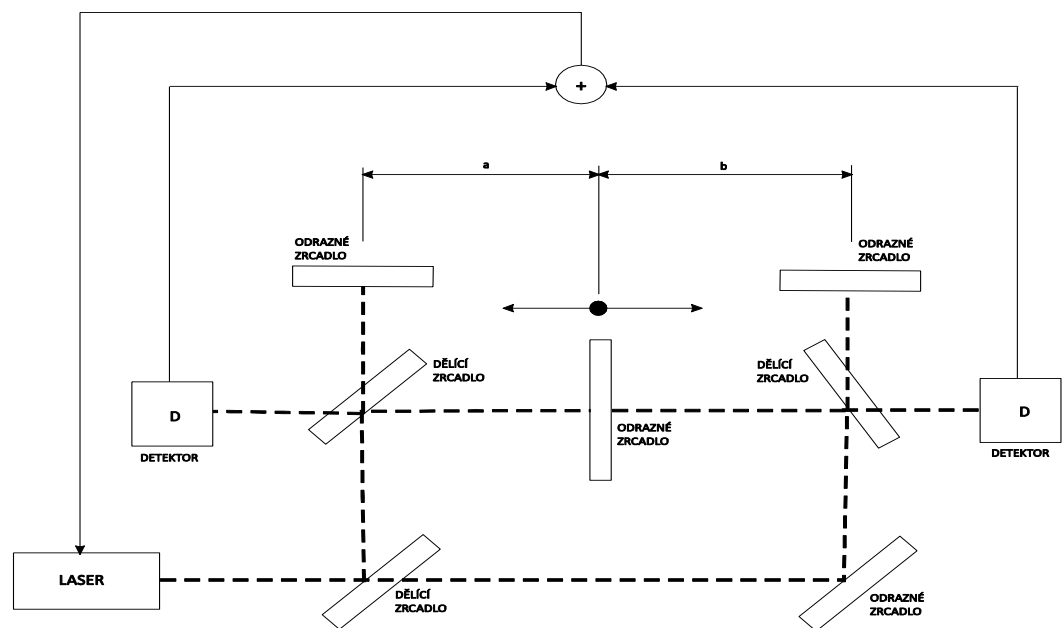
Obr. 13: Princip interferometru s konstantní délkou

4.2 Interferometr s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu

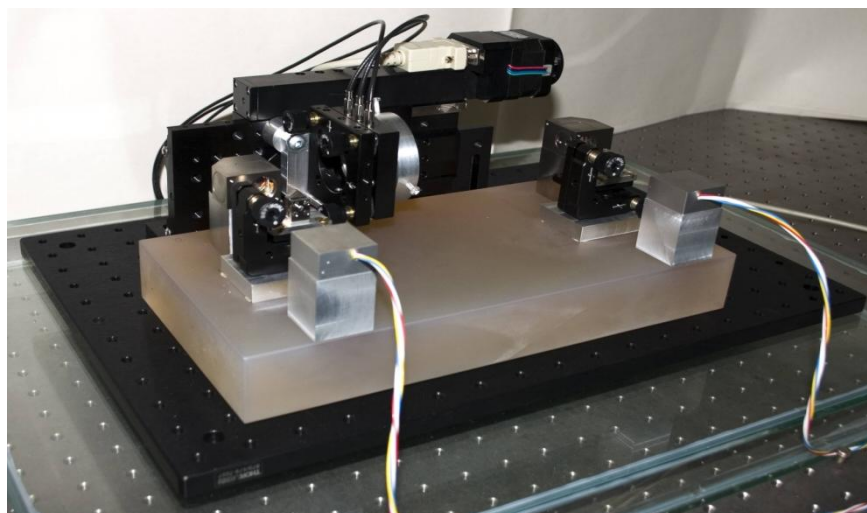
Tento interferometr je odlišný v tom, že vlnová délka laserového zdroje není odvozena od optické frekvence stabilizovaného laseru, ale od pevné mechanické délky, která je současně měřicím rozsahem celého systému.

Sestava (obr. 14, 15) se skládá ze zdroje, kterým je Helium-Neonový laser (He-Ne laser) s vlnovou délkou 633 nm, dělicího a odrazného zrcadla, dvou interferometrických jednotek, rovinného zrcadla a dvou detekčních jednotek.

Rovinné zrcadlo je umístěno mezi interferometrickými jednotkami a pomocí elektrického posuvu mění svoji polohu. Dochází ke změně vzdáleností mezi rovinným zrcadlem a interferometrickými jednotkami. Změna je zaznamenána detekčními jednotkami, ale protože se signály z obou detekčních jednotek sčítají, je výsledná mechanická délka konstantní. Od této pevné mechanické délky je odvozena vlnová délka laserového zdroje.



Obr. 14. Schéma sestavy



Obr. 15: *Interferometrická sestava*

4.3 Chyby interferometru

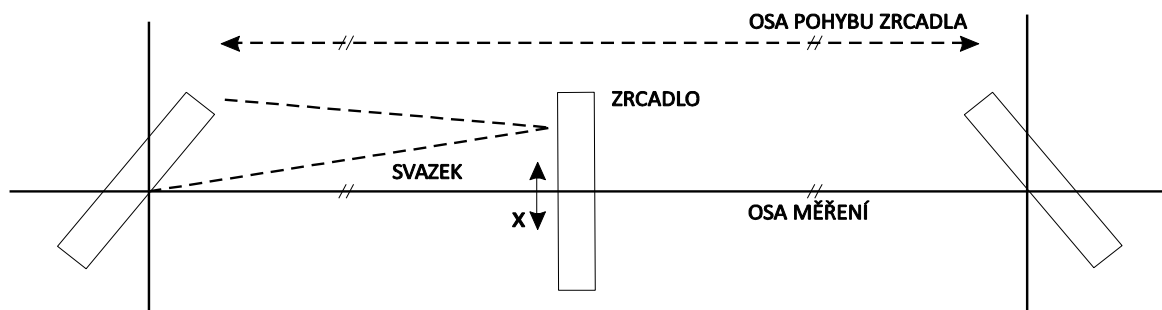
Cílem snažení je ověřit navrhovaný princip interferometrického měření s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu v ose měření, který byl popsán v předcházející kapitole. Aby se podařilo prokázat, že systém sleduje změnu vlnové délky změny indexu lomu v atmosféře, měla by experimentální sestava být schopna měření ve zvoleném rozsahu délek s celkovou chybou (způsobenou ostatními vlivy) výrazně menší, než je efekt způsobený indexem lomu.

Vycházíme z předpokladu, že laser lze ladit v rozmezí cca 1 GHz optického kmitočtu, čemuž odpovídá určitý rozsah změn indexu lomu, který dokážeme přeladěním laseru pokrýt. Ovlivňování hodnoty indexu lomu v atmosféře, budeme provádět prostřednictvím změn teplot okolí, protože vliv teploty vzduchu na hodnotu indexu lomu je výrazný a řídit teplotu je technicky relativně snadné. Přeladění laseru tedy vymezi pracovní teplotní rozsah pro náš experiment. Tato změna indexu lomu pak určí, jaké budou tomu odpovídající změny délky (vlnové délky) v našem pracovním rozsahu. Geometrické chyby interferometru musí být tedy signifikantně nižší, abychom prokázali funkčnost principu.

Zaměříme se nyní na základní dva druhy geometrických chyb interferometrického měření, kosinovou a Abbeho chybu, které obě souvisejí s úhlovým nastavením laserových svazků a optických komponentů interferometrů.

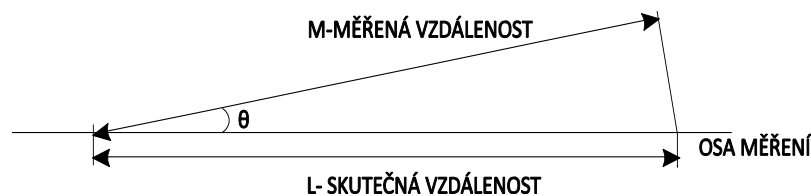
4.3.1 Kosinová chyba

Kosinová chyba je úhlová odchylka svazku od měřicí osy. Svazek se nepohybuje rovnoběžně s osou, ale dochází k odchýlení (obr. 16).



Obr. 16: Odchylka paprsku

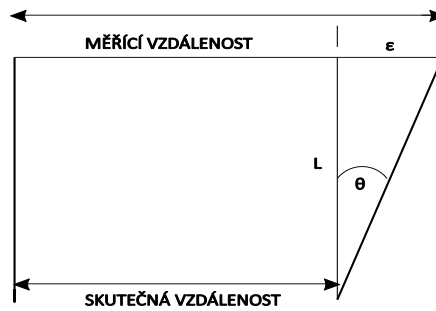
Kosinová chyba (obr. 17) se vypočítá pomocí vztahu $M=L.\cos\theta$, M je měřená vzdálenost, L je skutečná vzdálenost a θ je úhel odklonu svazku od osy měření. Kosinová chyba je dána rozdílem měřené a skutečné vzdálenosti ($M-L$).



Obr. 17: Kosinová chyba

4.3.2 Abbeho chyba

Abbeho chyba (obr. 18), je chyba kde se od sebe liší skutečná a měřená dráha. Tato chyba může nastat např. v důsledku náklonu zrcadla, při kterém se zrcadlo nepohybuje kolmo k ose, ale dochází k jeho náklonu. Abbeho chybu lze vypočítat pomocí vztahu $\varepsilon=L.\tan\theta$, kde ε je rozdíl drah, θ je úhel náklonu.



Obr. 18: *Abbeho chyba*

4.4 Výpočet velikosti chyb

Závislost vlnové délky a změně frekvence

Z výpočtu je zjištěna změna vlnové délky záření při změně frekvence laserového zdroje. Vycházíme z orientační hodnoty vlnová délka $\lambda = 633 \text{ nm}$ (He-Ne laser), přeladění laseru $\Delta\nu$ je cca 1 GHz optického kmitočtu.

$$\text{frekvence laserového zdroje: } \nu = \frac{cn}{\lambda} = \frac{(3 \cdot 10^8) \cdot 1,000272}{(633 \cdot 10^{-9})} = 4,740625592 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

změna frekvence přeladění o $\Delta\nu$:

$$\nu + \Delta\nu = 4,740625592 \cdot 10^{14} + 1 \cdot 10^9 = 4,740635592 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{vlnová délka, odpovídající } \nu: \lambda_1 = \frac{cn}{\nu} = \frac{(3 \cdot 10^8) \cdot 1,000272}{(4,740625592 \cdot 10^{14})} = 633,00 \text{ nm}$$

$$\text{vlnová délka odpovídající } \nu + \Delta\nu: \lambda_2 = \frac{cn}{\nu + \Delta\nu} = \frac{(3 \cdot 10^8) \cdot 1,000272}{(4,740635592 \cdot 10^{14})} = 632,9987 \text{ nm}$$

změna vlnové délky:

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 633,00 - 632,9987 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ nm} = 1,3 \text{ pm}$$

Při změně frekvence o 1 GHz se vlnová délka změní o 1,3 pm.

Relativní změna vlnové délky

$$\Delta\lambda_{relativ} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{(1,3 \cdot 10^{-3})}{633} = 2,053 \cdot 10^{-6} \doteq 2,1 \cdot 10^{-6}$$

$L = 10 \text{ cm} = 1 \cdot 10^8 \text{ nm}$ (měřicí rozsah interferometru)

$$L \cdot \Delta\lambda_{relativ} = (1 \cdot 10^8) \cdot (2,1 \cdot 10^{-6}) = 210 \text{ nm}$$

Při nastavování chceme docílit toho, aby chyby byly řekněme desetkrát menší, než je úroveň, při které pozorujeme náš efekt, tedy aby se pohybovaly maximálně okolo 20 nm nebo v lepším případě, aby byly menší než 20 nm.

Změna indexu lomu při změně teploty

Výpočtem se určí, o kolik stupňů se musí změnit teplota uvnitř termostatické skříně, aby se index lomu změnil o $2,1 \cdot 10^{-6}$. K výpočtu byla použita Edlénova rovnice, ve které se mění pouze teplota, ostatní parametry jsou konstantní. Vlhkost vzduchu je 50% a tlak je 760 mmHG. V tabulce 1 jsou uvedeny výsledky výpočtů.

$$n = 1 + (3,8369 \cdot 10^{-7} \cdot P) \left[\frac{1 + P \cdot (0,817 - 0,0133 \cdot T) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03661 \cdot T} \right] - 5,607943 \cdot 10^{-8} \cdot f$$

$$f = \frac{RH}{100} \cdot [4,07859739 + 0,44301857 \cdot T + 0,00232093 \cdot T^2 + 0,00045785 \cdot T^3]$$

$T [^{\circ}\text{C}]$	n
20,0	1,000271442
20,5	1,000270652
21,0	1,000270374
21,5	1,000269897
22,0	1,000269420
22,5	1,000268971

Tab. 1: Změna indexu lomu vzduchu při změně teploty

$$\Delta n = n_{[20^{\circ}\text{C}]} - n_{[22^{\circ}\text{C}]} = 1,000271442 - 1,000269420 = 2,022 \cdot 10^{-6}$$

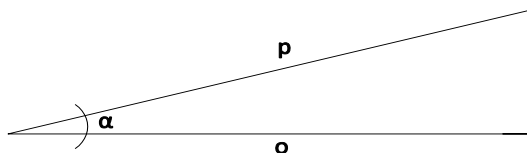
Z výsledků uvedených v tabulce 1 vyplývá, že teplota uvnitř termostatické skříně se musí změnit o 2°C , aby se index lomu změnil přibližně o $2,1 \cdot 10^{-6}$.

Úhlová změna

Výpočtem úhlové změny (obr. 19) je určen maximální odklon (úhel) paprsku od osy měření.

$$\cos\alpha = \frac{o}{p} = \frac{100}{1,00002} = 0,9999998 \text{ mm} \Rightarrow \alpha = 0,036^\circ = 2,2'$$

Paprsek se může odklonit maximálně o 2,2'.



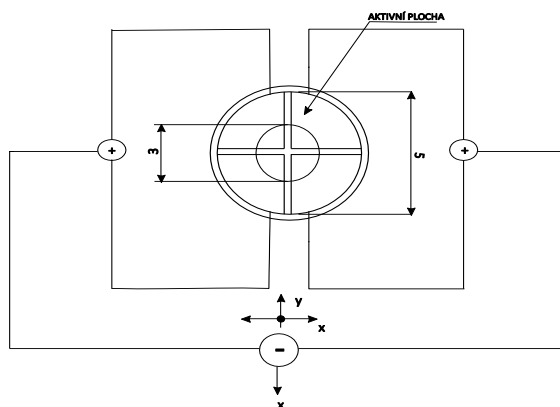
Obr. 19: Úhlová změna

4.5 Čtyřkvadrantní detektor (4Q detektor)

4Q detektor (obr. 20) slouží k nastavení rovnoběžnosti laserového svazku, citlivost detektoru je cca 1 μ m. Rozlišení 4Q detektoru je ovlivňováno šumem, geometrickými chybami detektoru a odchylkami gausovského profilu svazku. Pomocí 4Q detektoru minimalizujeme úhlové chyby, jako je Kosinová a Abbeho chyba.

Detektor má průměr asi 5mm, je rozdělen na čtyři kvadranty. Laserový svazek, který má průměr 3mm, dopadá na 4Q detektor, signál z detektoru jde do počítače a pomocí softwaru „Labview“ pozorujeme na monitoru počítače odchýlení laserového svazku ve dvou osách.

Odchýlení svazku na ose x je dáno součtem pravých a levých kvadrantů a jejich následným odečtením. Odchýlení svazku na ose y je dáno součtem horních a spodních kvadrantů a jejich následným odečtením.

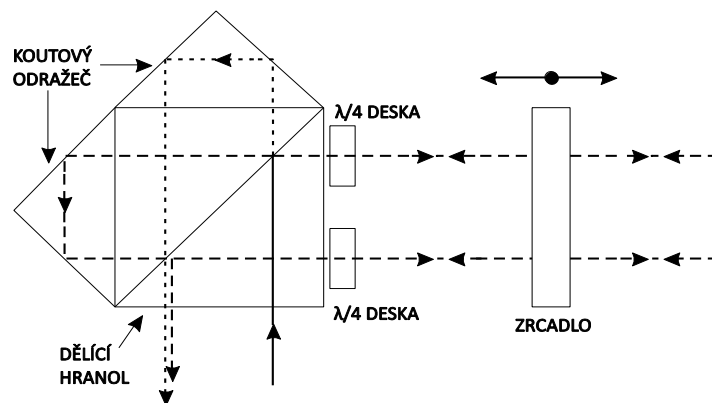


Obr. 20: Schéma 4Q detektoru

4.6 Interferometrická jednotka

Optická konfigurace se čtyřnásobným průchodem a odrazem od rovinného zrcadla není teplotně kompenzovaná. Referenční a měřicí části jsou různě dlouhé. Tato interferometrická jednotka (obr. 21) je opticky velmi složitá, nepodařilo se odstranit úhlové odchylky.

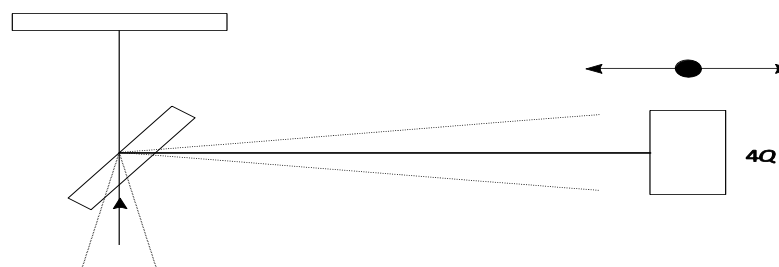
Interferometrická jednotka se skládá z dělicího hranolu, dvou koutových odražečů a dvou čtvrtvlnových desek ($\lambda/4$).



Obr. 21: Schéma interferometrické jednotky

4.6.1 Eliminace kosinové chyby u jednotky s dvěma průchody

K zjištění a odstranění kosinové chyby (obr. 22) se používá 4Q detektor, který je umístěn mezi interferometrickými jednotkami v držáku stavitelném ve dvou osách a připevněn k posuvu. Cílem je, aby měřicí paprsek dopadal na 4Q detektor kolmo, tedy aby byl rovnoběžný osou.



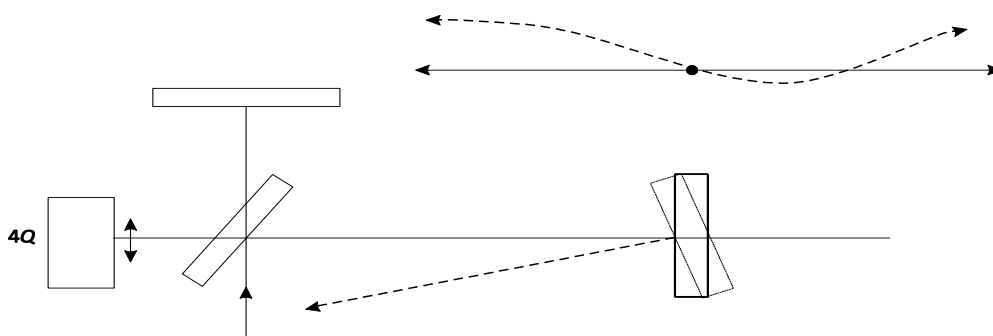
Obr. 22: Schéma kosinové chyby

K nastavování se používají dva 4Q detektory a dvě zrcadla, protože pracujeme se dvěma interferometrickými jednotkami. Zrcadla, která jsou součástí sestavy, jsou před interferometrickými jednotkami na justážních stolcích, které jsou úhlově stavitelné.

Nastavování probíhá tak, že 4Q detektor se umístí mezi interferometrické jednotky tak, aby laserový svazek dopadal přibližně do středu detektoru. Pomocí posuvu se mění jeho poloha, když je 4Q detektor u interferometrické jednotky, použijí se k nastavování šrouby na držáku detektoru, a když je ve vzdálenější poloze, nastavuje se pomocí šroubů na justážním stolku. Odchylka laserové svazku od středu 4Q detektoru je pozorovatelná na monitoru počítače.

4.6.2 Eliminace úhlové odchylky zrcadla (Abbeho chyba) u jednotky s dvěma průchody

K zjištění a odstranění úhlové odchylky zrcadla (obr. 23) se používá 4Q detektor, který je umístěn v místě výstupu referenčního a měřícího paprsku. Cílem tohoto nastavování je, aby laserový svazek dopadající na 4Q detektor, se nevychyloval.



Obr. 23. Schéma úhlové odchylky zrcadla

4Q detektor je umístěn v držáku, který je stavitelný ve dvou osách díky šroubům s jemným závitem. Zrcadlo umístěné mezi interferometrickými jednotkami, je upevněno ve stavitelném držáku a díky posuvu může měnit svoji polohu mezi interferometrickými jednotkami.

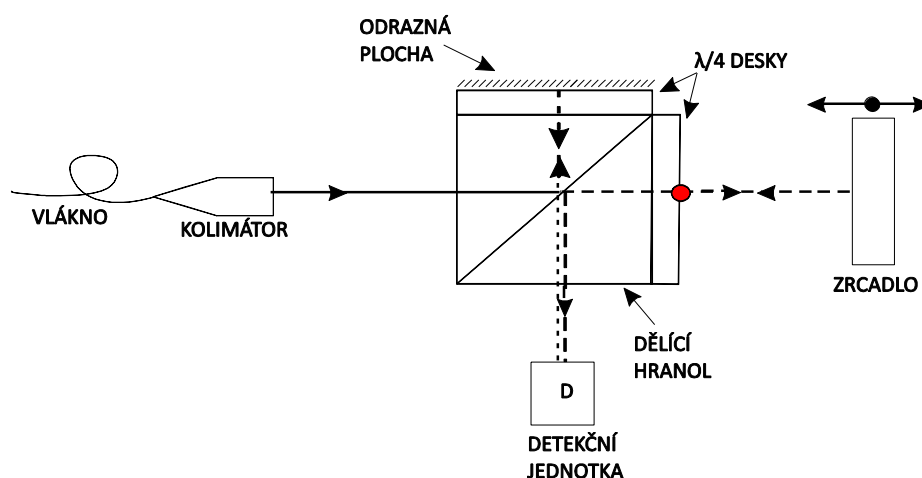
K nastavování se využívají justážní šrouby na držáku 4Q detektoru a na držáku zrcadla. Zrcadlo se pohybuje mezi interferometrickými jednotkami, po přiblížení zrcadla

k interferometrické jednotce se k nastavování použijí šrouby na držáku 4Q detektoru po oddálení zrcadla od interferometrické jednotky se použijí šrouby na držáku zrcadla.

Při nastavování se použily dva 4Q detektory, protože pracujeme s dvěma interferometrickými jednotkami. Podařilo se nastavit pouze jeden z laserových svazků tak, aby se nevychyloval. U druhého svazku došlo k odchylce na ose x o 592 μm a na ose y o 1079 μm .

4.7 Nová konfigurace

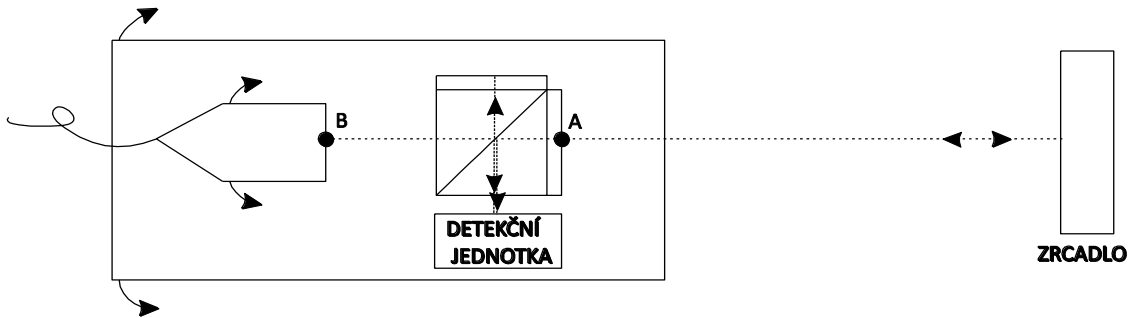
Nová konfigurace (obr. 24) se od předchozí liší ve vedení laserového svazku a v samotné interferometrické jednotce. Laserový svazek je veden optickým vláknem. Interferometrická jednotka je opticky jednodušší a teplotně kompenzovaná. Skládá se z dělicího hranolu, dvou $\lambda/4$ desek. Na $\lambda/4$ desce v referenční větvi je nanesena odrazná vrstva. Referenční a měřicí větve jsou stejně dlouhé. Interferometrická jednotka je úhlově stavitelná ve dvou osách, horizontální a vertikální.



Obr. 24: Schéma nové konfigurace

4.7.1 Nová konfigurace – eliminace chyb

V nové konfiguraci (obr. 25) je interferometrická jednotka spolu s kolimátorem umístěná na desce, která je úhlově stavitelná vzhledem k bodu *A*, a samotný kolimátor je ještě úhlově stavitelný vzhledem k bodu *B*.

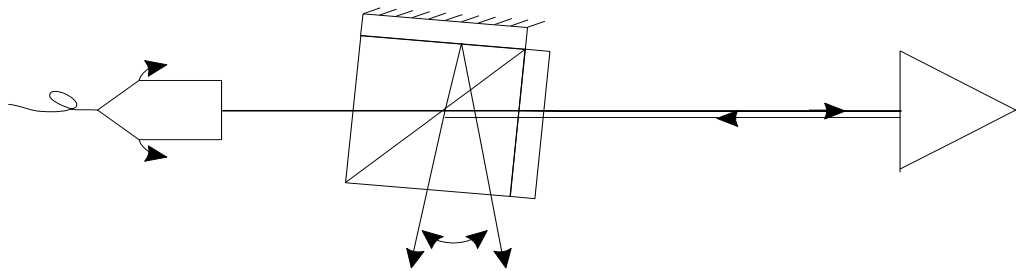


Obr. 25: Nová konfigurace

V prvním kroku nastavování se snažíme o to, aby svazky vstupující do interferometrické jednotky byly na ni kolmé. Pokud tomu tak není, dochází k odchylce referenčního a měřícího svazku na výstupu z interferometrické jednotky. K tomuto nastavení se použije koutový odražeč, který zaručuje rovnoběžnost svazku (svazek vstupující je rovnoběžný se svazkem vystupujícím z koutového odražeče). Sesouhlasení svazků se dělá pomocí kolimátoru. Toto sesouhlasení není tak zásadní, má vliv na kontrast (mění se úhel vlnoploch).

Velikost odchylky

Odchylka je patrná na výstupu referenčního a měřícího svazku z interferometrické jednotky, svazky nesplývají v jeden (obr. 26), je pozorovatelná ve větší vzdálenosti.



Obr. 26: Odchylka svazků

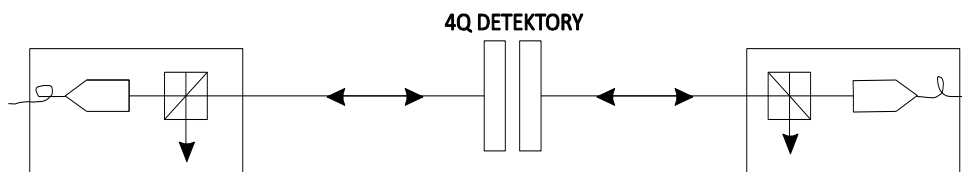
Výpočet odchylky α :

l ...vzdálenost

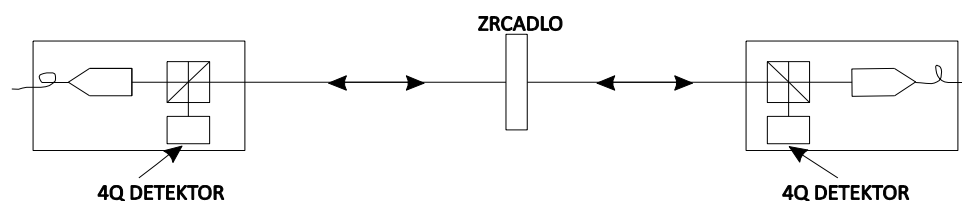
$$a = \operatorname{tg} \alpha \cdot l = 0,036 \cdot 1,5 = 9,43 \cdot 10^{-4} \text{m} = 0,943 \text{mm} \doteq 1 \text{mm}$$

Na vzdálenost 1,5m se mohou svazky vůči sobě posunout o 1mm.

Poté co se nastaví kolmost laserového svazku, tak aby co nejlépe vyhovovalo vypočtené odchylce, proběhne stejný postup nastavování jako v kapitole 4.6, při němž se snažíme odstranit kosinovou a Abbeho chybu pomocí 4Q detektoru. 4Q detektory jsou nejprve na místě zrcadla mezi interferometrickými jednotkami (eliminace kosinové chyby) (obr. 27) a poté na výstupu na místě detekčních jednotek (eliminace Abbeho chyby) (obr. 28).



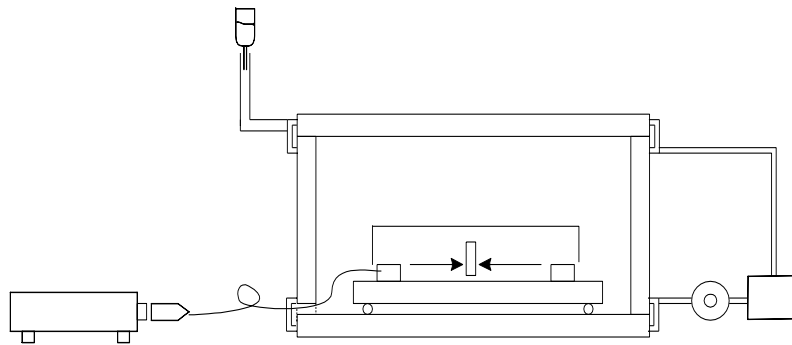
Obr. 27: Umístění 4Q detektorů



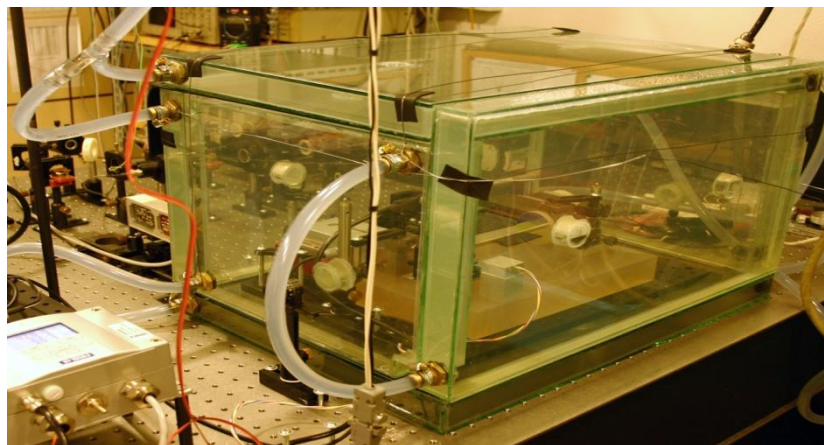
Obr. 28: Umístění 4Q detektorů

4.8 Termostatická skříň

Termostatická skříň (obr. 29, 30) je vyrobena ze skla o objemu cca 33 litrů. Skládá se z šesti stěn, které jsou vzájemně propojeny hadicemi, součástí termostatické skříně je vyrovnávací nádržka, čerpadlo a chladicí zařízení. Chladicí zařízení umožňuje měnit teplotu vody a čerpadlo slouží k její cirkulaci.



Obr. 29: *Termostatická skříň*



Obr. 30: *Termostatická skříň*

Termostatická skříň slouží k udržování vhodných podmínek pro měření. Uvnitř termostatické skříně je měřicí sestava a čidla měřících přístrojů, která sledují změny podmínek uvnitř.

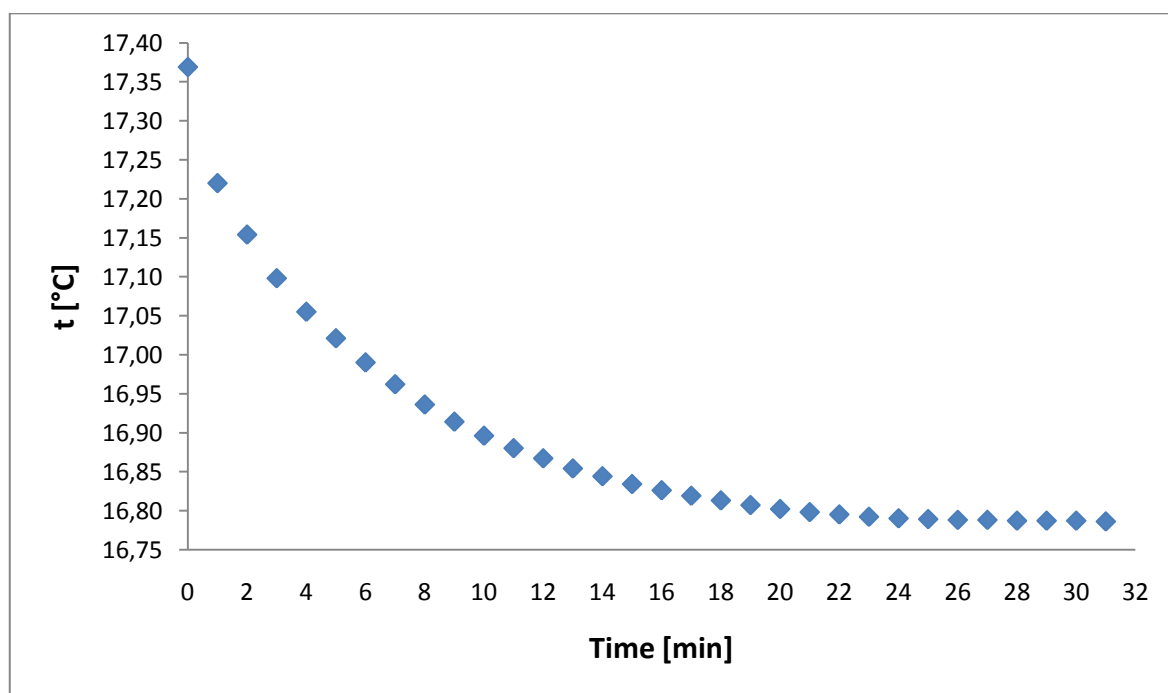
V termostatické skříně musí být minimum vzduchových bublin, pokud tomu tak není tak při samotném měření zaznamenáváme vibrace, které jsou způsobeny cirkulací vody.

5. VÝSLEDKY PRÁCE A DISKUSE

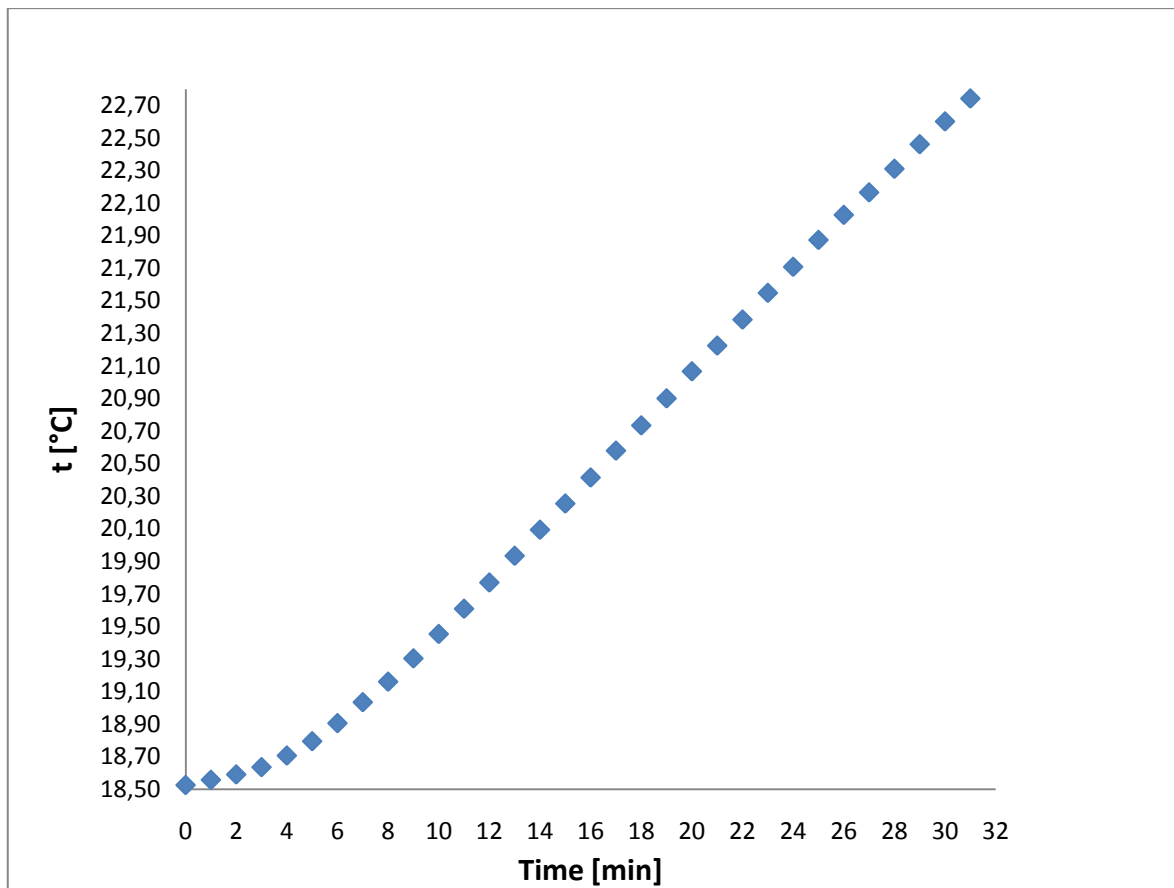
5.1 Test termostatické skříně

Dříve, než se termostatická skříň nainstalovala do laboratoře, ve které je velké množství nákladného zařízení, proběhlo její testování. Testovala se těsnost jednotlivých dílů a ventilů. Poté se termostatická skříň složila, naplnila vodou a prováděl se test se změnou teploty uvnitř. K termostatické skříně se připojilo chladicí zařízení, čerpadlo a dovnitř se umístil měřič teploty. Nejprve se testovalo chlazení vody (graf. 1) a poté ohřev (graf. 2). Chlazení a ohřívání vody probíhalo po dobu 32 minut a změna teploty se zaznamenávala po minutě.

Při chlazení vody se teplota snížila o $0,5^{\circ}\text{C}$ uvnitř termostatické skříně a při ohřevu se teplota zvýšila o $4,2^{\circ}\text{C}$.



Graf 1: Změna teploty (chlazení)



Graf 2: Změna teploty (ohřev)

5.2 Ověření činnosti interferometru

Měření probíhalo v laboratorních podmínkách, délka měřící větve interferometru byla konstantní a pomocí termostatické skříně se měnily podmínky měření. Docházelo ke změně teploty, tlaku, vlhkosti a koncentraci CO_2 . Změny byly pomocí počítače zaznamenány a z nich byla vypočtena změna indexu lomu vzduchu.

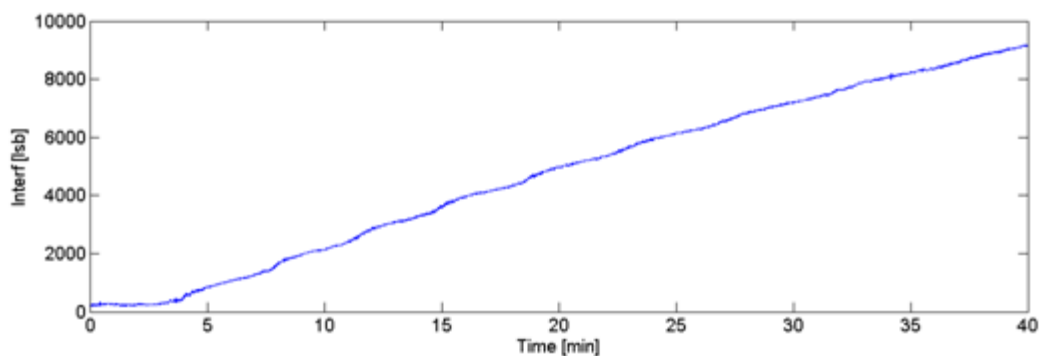
V případě tohoto měření je jeden interferenční proužek roven $\lambda/4$, interferenční proužek je interpolován 1024 kroky tedy

$$1lsb = (633nm/4)/1024 = 0,155 \text{ nm} = 155 \text{ pm}.$$

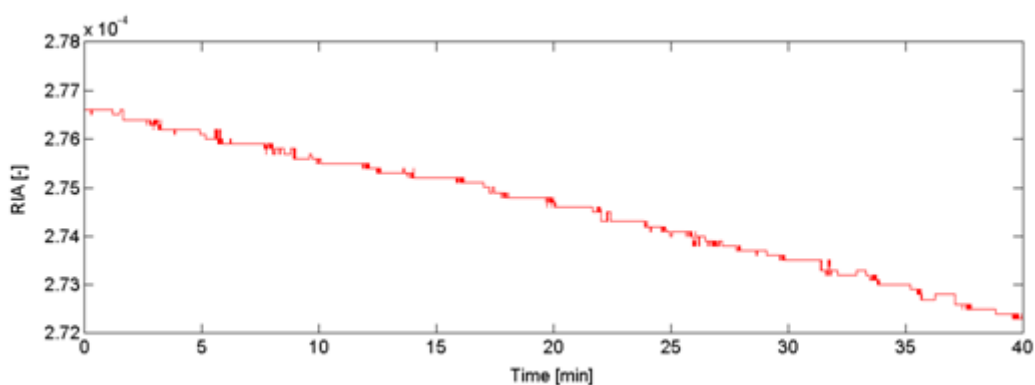
Nejprve byl proveden ohřev vody uvnitř termostatické skříně, to znamená, že teplota vně termostatické skříně se zvyšovala. Na grafu 1a je záznam z interferometru v lsb a na grafu 1b je změna relativního indexu lomu

$$n_R = n_A - l$$

kde n_A je absolutní index lomu. V (tab. 2) jsou uvedeny počáteční a konečné hodnoty změn měřených veličin.



Graf. 1a: Záznam interferometru (ohřev)



Graf. 1b: Relativní index lomu (ohřev)

<i>Změny hodnot</i>	<i>t [°C]</i>	<i>p [kPa]</i>	<i>RH [%]</i>	<i>CO₂ [%]</i>	<i>index</i>	<i>Time [min]</i>
<i>Počátek</i>	22,5	969,0	40,3	0,141	1,0002766	40:19
<i>Konec</i>	24,4	967,8	35,7	0,125	1,0002723	

Tab. 2: Změny hodnot (ohřev)

Výpočet změny vlnové délky

a) ze záznamu interferometru

Změna vlnové délky se vypočítá podílem původní optické dráhy l_1 a nové optické dráhy l_2 .

Nová optická dráha je dána součtem původní optické dráhy l_1 a změny optické dráhy x .

Změna optické dráhy x se určí se záznamu interferometru.

$$x = x_2 - x_1 = 9144 - 220 = 8924 \text{ } lsb$$

$$x = 8924 \cdot 155(pm) = 1383220pm \doteq 1,4 \mu m$$

$$l_1 = 32 \cdot 10^{-2} m \text{ (optická dráha)}$$

$$l_2 = l_1 + x = 32 \cdot 10^{-2} + 1,4 \cdot 10^{-6} = 0,3200014 m$$

$$\Delta\lambda = \frac{l_1}{l_2} = \frac{32 \cdot 10^{-2}}{0,3200014} = 0,999995625$$

$$\Delta\lambda_{relativ} = \frac{1}{\Delta\lambda} - 1 = \frac{1}{0,999995625} - 1 = 4,3 \cdot 10^{-6}$$

b) ze změny indexu lomu vzduchu

$$\lambda_1 = \frac{cn_p}{v} = \frac{(3 \cdot 10^8) \cdot 1,0002766}{4,74^{14}} = 633,0864557 \text{ } nm$$

$$\lambda_2 = \frac{cn_k}{v} = \frac{(3 \cdot 10^8) \cdot 1,0002723}{4,74^{14}} = 633,0837342 \text{ } nm$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{633,0864557}{633,0837342} = 1,000004299$$

$$\Delta\lambda_{relativ} = \Delta\lambda - 1 = 1,000004299 - 1 = 4,299 \cdot 10^{-6} = 4,3 \cdot 10^{-6}$$

Změna vlnové délky je $4,3 \cdot 10^{-6}$.

6. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s laserovou interferometrií pro měření délek, vytvoření experimentální sestavy interferometru s kompenzací vlivu fluktuací indexu lomu vzduchu a ověření jeho funkce.

Experimentální sestava interferometru, jejíž součásti byly dvě interferometrické jednotky se čtyřnásobným průchodem a odrazem se neosvědčila, jelikož použité interferometrické jednotky jsou opticky velmi složité a nejsou teplotně kompenzované. Při nastavování celé sestavy se nepodařilo obě interferometrické jednotky nastavit tak, aby odchylka laserového svazku byla maximálně 20nm, to se podařilo pouze u jedné z nich.

Měření, které bylo provedeno, využilo tedy pouze jednu interferometrickou jednotku a pomocí ní se ověřil princip interferometru. Při ověřování principu interferometru se měnily podmínky měření, které byly zaznamenávány, a z nich byla vypočtena změna indexu lomu vzduchu pomocí Edlénovy rovnice.

Celé experimentální uspořádání interferometru prošlo změnou. Interferometrické jednotky, které se nyní používají, jsou opticky jednodušší a teplotně kompenzované. Laserový svazek je veden optickým vláknem. Celé sestava se musí opět znovu nastavit, aby při měření nedocházelo k chybám.

Z prvních náznaků se nové uspořádání jeví jako vhodné a mohlo by vést k úspěchu.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Anonym 1: *Newtonova skla* – základní informace

<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=551>, 2010

Anonym 2: *Koherence záření*- základní informace

<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>, 2010

Anonym 3: *Koherenční délka*

http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_length, 2010

Anonym 4: *Aplikace laserů*

<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>, 2010

Anonym 5: *Index lomu*

http://cs.wikipedia.org/wiki/Index_lomu, 2010

Bouchal Z.: *Optika (část 1)*

http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf, 2010

Fuka J., Havelka B.: *I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy*, díl IV., SPN Praha 1961

Hörtef H. et al., *Interferometrische Wegmessung mit automatischer Brechzahlkompensation*, Technisches Messen, tm 57, 1990, 346-350.

Jexová S., *Interference světla*, Česká oční optika, 2, 2008, 56 s.

Malý P.: *Optika*. 1.vyd. UK v Praze: Karolium, 2008. 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0

Matsumoto H., Honda T.: *High-accuracy length-measuring interferometer using the two-colour method of compensating for the refractive index of air*, Measurement, Science and Technology, 3, 1992, 1084-1086.

Ngoi B. K. A., Chin C. S.: *Self-Compensated Heterodyne Laser Interferometer*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 2000, 217-219s

Vrbová M. kolektiv.: *Odborná encyklopedie - Lasery a moderní optika*. 1.vyd. Praha: Prometheus, 1994. 474 s. ISBN 80-84849-56-9

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Konstruktivní interference

http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf

Obr. 2. Destruktivní interference

http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf

Obr. 3. Newtonova skla

Obr. 4. Interference monochromatického světla

jan.gfxs.cz/studium/files/optika/vlny.ppt

Obr. 5. Interference bílého světla

jan.gfxs.cz/studium/files/optika/vlny.ppt

Obr. 6. Michelsonův interferometr

Obr. 7. Jaminův interferometr

Obr. 8. Fabry-Perotův interferometr

Obr. 9. Spontánní emise

Obr. 10. Stimulovaná emise

Obr. 11. Schéma laseru

Obr. 12. Princip interferometru

Obr. 13. Princip interferometru s konstantní délkou

Obr. 14. Schéma sestavy

Obr. 15. Interferometrická sestava

Obr. 16. Odchylka paprsku

Obr. 17. Kosinová chyba

Obr. 18. Abbeho chyba

- Obr. 19. Úhlová změna
- Obr. 20. Schéma 4Q detektoru
- Obr. 21. Schéma interferometrické jednotky
- Obr. 22. Schéma kosinové chyby
- Obr. 23. Schéma úhlové odchyly zrcadla
- Obr. 24. Schéma nové konfigurace
- Obr. 25. Nová konfigurace
- Obr. 26 Odchylka svazků
- Obr. 27. Umístění 4Q detektorů
- Obr. 28: Umístění 4Q detektorů
- Obr. 29. Termostatická skříň
- Obr. 30. Termostatická skříň