

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI**

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

**KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY**



**Magisterská diplomová práce**

**Interferometrie délky se stojatou vlnou**

Autor:

Studijní program:

Studijní obor:

Forma studia:

Vedoucí práce:

Termín odevzdání práce:

Bc. Miroslava Holá

N1701 Fyzika

Aplikovaná fyzika

Prezenční

Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.

květen 2012

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora: Bc. Miroslava Holá  
Název práce: Interferometre délky se stojatou vlnou  
Typ práce: magisterská  
Pracoviště: Ústav přístrojové techniky AVČR  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.  
Rok obhajoby práce: 2012

### **Abstrakt:**

Diplomová práce navazuje na výsledky, kterých bylo dosaženo v rámci bakalářské práce. Interferometr s kompenzací indexu lomu vzduchu – experimentální ověření principu. Tato práce je zaměřena na experimentální ověření principu interferometru se stojatou vlnou vybuzenou v pasivním rezonátoru, přičemž je zachován princip stabilizace vlnové délky vůči mechanické referenci. Odměřování polohy je realizováno dvěma způsoby. První způsob je pomocí transparentního fotodetektoru v rezonátoru. Druhý způsob je speciální konfigurací Michelsonova interferometru. Mechanická reference představující délku rezonátoru a vymežující měřící rozsah spolu se stabilizací vlnové délky představuje systém kompenzující změny indexu lomu vzduchu v ose svazku. Ověření principu je srovnáváno s hodnotami indexu lomu vzduchu získanými tradiční nepřímou metodou prostřednictvím Edlénovy formule v rozsahu daném přeladěním optického kmitočtu laseru. Teoretická část se zabývá obecnými pojmy související s interferencí světla a indexem lomu vzduchu. Experimentální část je zaměřena na experimentální ověření principu interferometru se stojatou vlnou a vyhodnocení výsledků měření.

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

Počet stran: 79  
Počet příloh: 0  
Jazyk: Český

## **Bibliographical identification:**

Author's first name and surname: Bc. Miroslava Holá  
Title: Standing wave length interferometry  
Type of thesis: master  
Department: Institute of Scientific Instruments of the ASCR  
Supervisor: Doc. Ing. Josef Lazar, Ph.D.  
Year of presentation: 2012

### **Abstract:**

The master thesis drawing on the results achieved in my bachelor's thesis "Interferometer with compensation of the refractive index of air - experimental proof of principle" focuses on experimental verification of the principle of an interferometer with a standing wave energized in a passive resonator, and with the principle of stabilization of wavelength against the mechanical reference preserved. The measurement of the position is realized in two ways. The first way is by using a transparent photodetector in the resonator. The second method is a special configuration of the Michelson interferometer. The mechanical reference representing the length of the resonator and defining the measurement range with wavelength stabilization in a system compensating for changes in the refractive index of air in the beam axis. The verification of the principle is compared with the values of the refractive index of air generated by the traditional indirect method called the Edlén formula within the range given by realignment laser of the optical frequency. The theoretical part deals with general concepts related to the interference of light and the refractive index of air. The experimental part is focused on experimental verification of the principle of a standing wave interferometer and evaluation of measurement results.

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

Number of pages: 79  
Number of appendices: 0  
Language: Czech

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Interferometrie délky se stojatou vlnou** vypracovala samostatně a použila jsem pramenů, které cituji, a uvádím v přiloženém soupisu literatury.

V Olomouci, dne:

Podpis:

## **Poděkování**

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Josefu Lazarovi, Ph.D. za veškerou pomoc, poskytnuté rady, jak z teoretické, tak praktické oblasti, Ing. Jiřímu Krškovi za poskytnuté cenné rady při sestavování samotného interferometru a Ing. Zdeňku Buchtovi, Ph.D. za poskytnutou pomoc. Dále děkuji všem pracovníkům Oddělení koherenční optiky a technickému oddělení Ústavu přístrojové techniky AV ČR, kteří se podíleli na výrobě experimentálního zařízení.

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

## Obsah

ÚVOD .....	8
I    TEORETICKÁ ČÁST .....	9
1    Metrologie a interferometrie .....	9
1.1 Interference světla .....	9
1.1.1 Dvousvazková interference světla .....	10
1.1.2 Mnohosvazková interference světla .....	11
1.2 Interferometry .....	12
1.2.1 Michelsonův interferometr .....	13
1.2.2 Machův-Zehnderův interferometr .....	14
1.2.3 Fabryho-Perotův interferometr .....	14
1.2.4 Laserové interferometry .....	15
1.3 Detekční techniky pro vyhodnocení interferenční fáze .....	16
1.3.1 Homodynní detekce interferenční fáze .....	17
1.4 Optický rezonátor .....	18
1.4.1 Otevřený rezonátor .....	19
1.4.2 Sférické otevřené rezonátory .....	20
1.4.3 Stojatá vlna .....	21
1.5 Index lomu vzduchu a jeho vliv na interferometrická měření .....	22
II   EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	25
2    Úvod do problematiky .....	25
2.1 Závislost vlnové délky laserového zdroje .....	26
2.2 Interferometr s kompenzací indexu lomu vzduchu .....	27
3    Sestava s interferometrickými jednotkami s rovinným zrcadlem .....	28
3.1 Nastavení interferometru pomocí čtyřkvadrantního detektoru .....	30
3.1.1 Kosinová chyba .....	30
3.1.2 Abbeho chyba .....	31
3.1.3 Princip 4Q detektoru .....	31
3.1.3.1 Eliminace kosinové chyby .....	31
3.1.3.2 Eliminace Abbeho chyby .....	32
3.1.3.3 Výsledky potlačení uhlových chyb .....	33
4    Sestava s teplotně kompenzovanými interferometrickými jednotkami .....	33
4.1 Teplotní kompenzace interferometrické jednotky .....	35

4.2	Nastavení interferometru pomocí kamer .....	36
4.2.1	Nastavení interferometrických jednotek .....	36
4.2.2	Nastavení rovnoběžnosti svazků pomocí kamer a planparalelní desky .....	37
4.3	Termostatická skříň .....	38
4.4	Uspořádání experimentální sestavy .....	40
4.5	Výsledky měření .....	40
5	Koncept se stojatou vlnou v pasivním rezonátoru .....	42
5.1	Fabryho-Perotův rezonátor .....	42
5.2	Transparentní detektor .....	44
5.3	Předzesilovač pro transparentní fotodetektor .....	48
5.4	Experimentální sestava rezonátoru s transparentním fotodetektoem .....	52
6	Trojité interferometr .....	54
6.1	Interferometrická jednotka .....	55
6.2	Výsledky měření .....	57
6.2.1	Záznam interferometru při otevřené termostatické skříni .....	57
6.2.2	Záznam interferometru při zavřené termostatické skříni .....	59
6.2.3	Záznam interferometru při pojezdu .....	61
6.2.4	Záznam interferometru při změně teploty – ohřev .....	63
6.2.5	Záznam interferometru při změně teploty – chlazení .....	66
6.2.6	Změna indexu lomu v závislosti na vlnové délce laserového zdroje .....	69
	ZÁVĚR .....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	75
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK .....	77

## ÚVOD

Diplomová práce navazuje na výsledky, kterých bylo dosaženo v rámci bakalářské práce. Interferometr s kompenzací indexu lomu vzduchu – experimentální ověření principu. Koncept prezentovaný v bakalářské práci byl založen na systému dvou protiběžných interferometrů se stabilizací vlnové délky v atmosférických podmínkách.

Koncept, který prezentuji v této diplomové práci, je rozvinutím základního principu stabilizace vlnové délky, na rozdíl od tradičního přístupu, kdy je při interferometrickém měření stabilizován optický kmitočet koherentního zdroje – laseru a převod na vlnovou délku je odvozen od nepřímého měření indexu lomu atmosféry. V širším smyslu je tento koncept možné interpretovat jako interferometr se stojatou vlnou, která může být vybudena v pasivním vícesvazkovém interferometru – rezonátoru, nebo můžeme za stojatou vlnu považovat konstantní počet vlnových délek ve statickém interferometru. Princip stabilizace vlnové délky vůči mechanické referenci je v obou případech zachován. Odměrování polohy by mělo být realizováno transparentním fotodetektozem v rezonátoru, nebo speciální konfigurací Michelsonova interferometru. Mechanická reference představující délku rezonátoru a vymezující měřící rozsah spolu se stabilizací vlnové délky představuje systém kompenzující změny indexu lomu vzduchu v ose svazku. Ověření principu srovnáváme s hodnotami indexu lomu vzduchu získanými tradiční nepřímou metodou prostřednictvím Edlénovy formule v rozsahu daném přeladěním optického kmitočtu laseru.

Teoretická část práce se zabývá obecně známými pojmy souvisejícími s interferencí světla a optickým rezonátorem. Dále je zde popsán způsob detekce pro vyhodnocení interferenční fáze, kterou využívám při měření a odvození Edlénovy formule z které určuji index lomu vzduchu.

Experimentální část se zabývá sestavením, správným nastavením a ověřením principu interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu. Výrobou a ověřením funkčnosti transparentního fotodetektoru a sestavením interferometru se třemi výstupy a ověřením jeho funkčnosti.



# I TEORETICKÁ ČÁST

## 1 Metrologie a interferometrie

Zaměření práce, kterou zde prezentuji, je do oblasti metrologie délek. Na poli tzv. fundamentální metrologie, tj. měřících technik nejvyšší třídy přesnosti je měření délek výhradně doménou interferometrie s vysoce koherentními zdroji záření – lasery. Interferometrické odměřování vzdáleností je inkrementální měřicí metodou, kdy je elementární délka daná vlnovou délkou laseru odpočítána během změny měřené vzdálenosti. Tím je dána teoreticky neomezená dynamika měření, limitovaná jen koherenční délkou laseru a základní rozlišení odpovídající vlnové délce záření. Díky technikám číslicového zpracování signálu je v dnešní době běžné zvýšení rozlišení interpolací na sub-nanometrovou úroveň.

Interferometrie v širším smyslu je měřicí a kontrolní metoda, která využívá jevu zvaného interference (skládání vln) světla, za interferometr pak můžeme považovat zařízení, které interference světla využívá k nějakému účelu, nejčastěji k měření. Jev interference je výsledkem vlnové povahy světla. Světelnou vlnu můžeme charakterizovat vlnovou délkou  $\lambda$  nebo frekvencí  $\nu$ . Z hlediska počtu interferujících vln rozeznáváme interferenci dvousvazkovou a mnohosvazkovou.

### 1.1 Interference světla

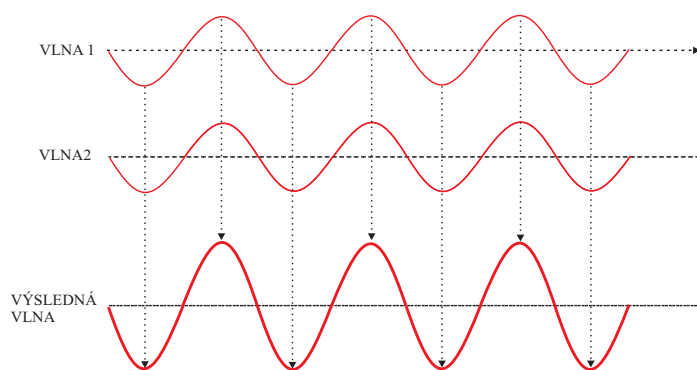
Interference světla je jev, který vyplývá z principu superpozice. Tento princip říká, že pokud jsou elektrická pole  $\vec{E}_1, \vec{E}_2$  řešením Maxwellových rovnic pro dané prostředí, je řešením také  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . Tento princip platí pro libovolný počet polí. Jsou-li  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4, \dots$  řešením vlnové rovnice, je řešením i jejich suma

$$\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k. \quad (1)$$

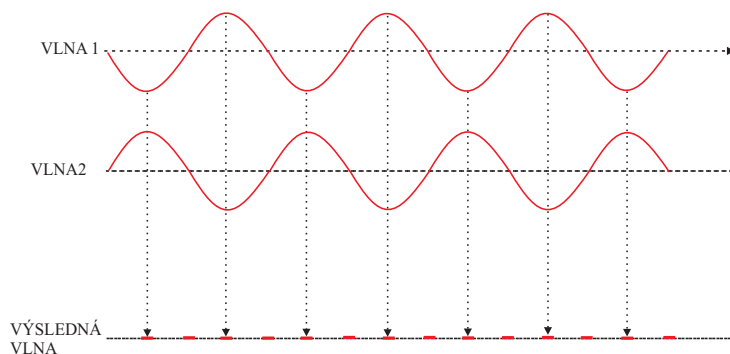
Okem a detektory zaznamenáváme intenzitu světla, která je dána výrazem

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

Výsledek interference světla závisí na tom, jak jsou vůči sobě posunuta obě vlnění, jinými slovy jaký je mezi nimi fázový rozdíl  $\Delta l$ . Pokud je fázový rozdíl  $\Delta l$  roven sudým násobkům půlvln, tedy  $\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}$ , vlnění se skládají ze stejné fáze, výsledná intenzita se zesílí, vznikají maxima a dochází k tzv. *konstruktivní interferenci* (Obr. 1). Pokud je fázový rozdíl roven lichým násobkům půlvln, tedy  $\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$ , vlnění se setkávají s opačnou fází, výsledná intenzita se zeslabuje, vznikají minima a dochází k tzv. *destruktivní interferenci* (Obr. 2) [2].



Obr 1. *Konstruktivní interference (světelné vlny jsou ve fázi)*



Obr. 2 *Destruktivní interference (světelné vlny jsou v protifázi)*

### 1.1.1 Dvousvazková interference světla

Dvousvazková interference světla je interference dvou koherentních světelných vln [3]. Nejjednodušším případem dvousvazkové interference světla je interference dvou rovinných monochromatických vln.

Skládají-li se dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami  $A_1(\vec{r})$  a  $A_2(\vec{r})$ , výsledná vlna  $A(\vec{r})$  je rovna

$$A(\vec{r}) = A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r}), \quad (3)$$

kde  $A_1(\vec{r}) = \sqrt{I_1} \exp(-j\varphi_1)$  a  $A_2(\vec{r}) = \sqrt{I_2} \exp(-j\varphi_2)$ . Intenzita výsledného interferenčního obrazce je rovna

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (4)$$

kde  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  je fázový rozdíl. Interferenční obrazec bude tvořen proužky pro kontrast interferenční proužků platí

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}. \quad (5)$$

### 1.1.2 Mnohosvazková interference světla

O mnohosvazkové interferenci světla (Obr. 3) hovoříme tehdy, když spolu interferují více než dvě koherentní světelné vlny [3]. Mějme vrstvu tloušťky  $l$ , jejíž oba povrchy mají velkou odrazivost  $R$  a propustnost  $T$ . Odrazivost ostatních ploch a absorpci neuvažujeme. Na desku dopadá kolmo rovinná vlna o intenzitě  $I_0 = 1$ . Svazkům, které vykonávají sudý počet odrazů ( $m = 0, 2, 4, 6, 8, \dots$ ) náležejí intenzity  $I_i = T^2, T^2 R^2, T^2 R^4, T^2 R^6, T^2 R^8, \dots$ . Tyto paprsky spolu interferují v nekonečnu nebo v ohniskové rovině čočky [4].

Předpokládejme, že úhel  $\theta = 0$ . Pokud je vzdálenost  $l$  rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky ( $2l = n\lambda$ ), dochází ke konstruktivní interferenci. Pro světelnou intenzitu na ose svazku platí vztah

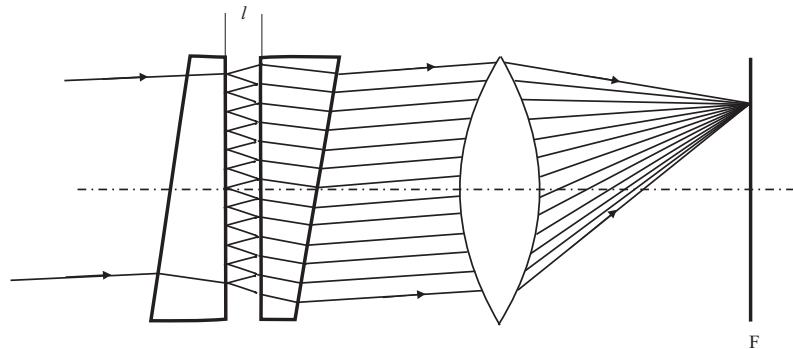
$$I = \frac{T^2}{1 - 2R \cos \varphi + R^2} = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (6)$$

kde  $\varphi = 4\pi l / \lambda$  a  $F = 4R / (1 - R)^2$  je činitel jemnosti.

Kontrast je dán vztahem

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2R}{R^2 + 1}. \quad (7)$$

Platí tedy, že kontrast je maximální pro odrazivost vrstvy, která se blíže 1 [4].



Obr. 3 Schéma mnohosvazková interference – interferenční obrazec vzniká v ohniskové rovině čočky

## 1.2 Interferometry

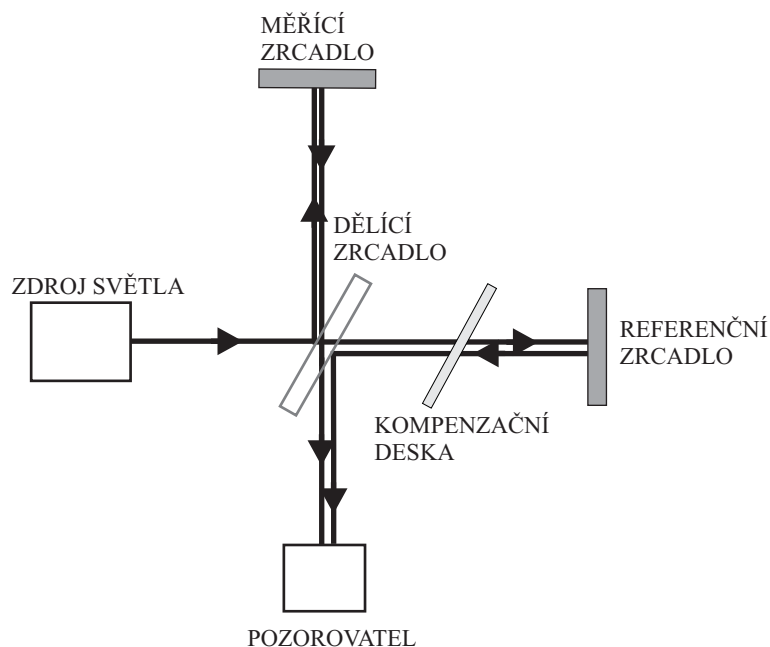
Interferometr je optický přístroj, který použitím děliče světla štěpí dopadající vlnu na dvě vlny (popř. více vln, viz výše), které urazí různé vzdálenosti. Použitím zrcadel změní jejich směr tak, aby se použitím druhého (nebo stejného) děliče světla opět spojily a detekuje intenzitu, jako výsledek jejich superpozice [5].

Princip interferometru je založen na interferenci světla. Vzhledem k velmi krátké vlnové délce viditelného světla nalézají uplatnění především jako přístroje určené k měření různých veličin, nejčastěji rozměrových. O přístrojích k měření délek se někdy mluví jako o *interferenčních komparátorech* (např. Michelsonův interferometr) proto, že interference světla dává informaci o rozdílu délek dvou ramen, dále pak přístroje, jejichž účelem je stanovit relativní změny rychlosti šíření světla a tak určit změny indexu lomu plynů nebo kapalin – *interferenční refraktometry* (např. Rayleighův interferometr) a přístroje k určení spektrální struktury zdrojů záření, zvané *interferenční spektroskopie* (např. Fabryho-Perotův interferometr) [6]. V následujícím malém přehledu budou uvedeny tři vybrané typy interferometrů, relevantní pro tuto práci.

### 1.2.1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je založen na dvousvazkové interferenci světla s dělením amplitudy. Patří mezi nejdůležitější typy interferometrů jednak pro své rozmanité použití, jednak také proto, že je prototypem mnoha moderních přístrojů, především systémů pro měření délky. Svoji proslulost získal tento interferometr také díky tzv. *Michelsonovu-Morleyovu pokusu*, kterým měla být roku 1881 dokázána existence světelného éteru. Negativní výsledek tohoto pokusu vedl ke vzniku teorie relativity [7].

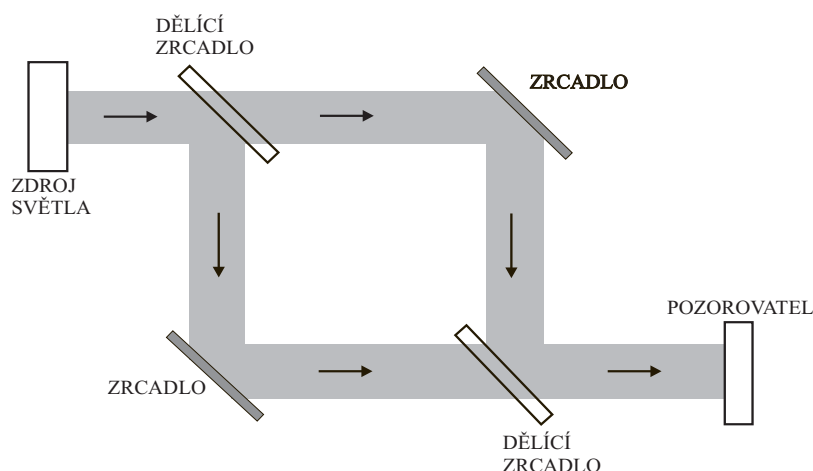
Nejjednodušší, principiální uspořádání Michelsonova interferometru je na obr. 4. Interferometr se skládá ze zdroje, dělicího zrcadla a dvou odrazných zrcadel (referenční a měřící). Světelná vlna (rovinná vlna, v případě laseru gaussovský svazek) vychází ze zdroje. Amplituda vlny je na dělicím, polopropustném zrcadle rozdělena. 50% výkonu směřuje do referenční větve a druhá polovina výkonu směřuje do měřící větve. Tyto vlny jsou příslušnými zrcadly odraženy zpět na dělicí zrcadlo, kde dochází k opětovnému spojení do jedné vlny. Podle rozdílu délky obou ramen na výstupu interferometru vzniká interference a pozorujeme interferenční obrazce (interferenční proužky nebo kroužky).



Obr. 4 Schématické uspořádání Michelsonova interferometru

### 1.2.2 Machův-Zehnderův interferometr

Dalším představitelem dvousvazkového interferometru je Machův-Zehnderův interferometr (Obr. 5), který opět využívá dělení amplitudy. Tento interferometr se skládá ze dvou zrcadel a dvou polopropustných zrcadel. Prvním polopropustným zrcadlem je vstupní světelná vlna rozdělena na dvě (referenční a měřicí). Obě světelné vlny procházejí vlastní trasou a dopadají na druhé polopropustné zrcadlo. Na tomto zrcadle jsou vlny soustředěny do jedné osy šíření. Na výstupu pozorujeme interferenci dvou světelných vln.



Obr. 5 Schématické uspořádání Machova-Zehnderova interferometru

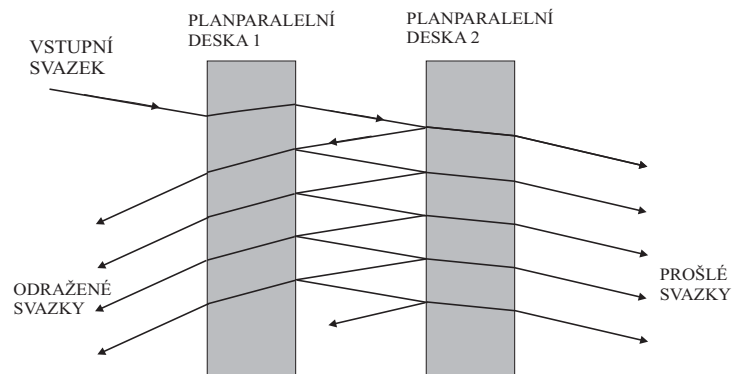
Tento typ interferometru bývá uváděn jako nejtypičtější konfigurace interferometru, protože různé trasy dvou svazků jsou jasně zřetelné a oddělené. Nalézá uplatnění např. při měření fázových objektů vložených do jedné z větví.

### 1.2.3 Fabryho-Perotův interferometr

V interferometru Fabryho-Perotově (v základní, principiální konfiguraci) je interferenční obraz vytvořen svazky mnohonásobně odraženými ve vzduchové vrstvě mezi dvěma skleněnými deskami (zrcadly), jejichž vnitřní strany jsou rovinné, vzájemně rovnoběžné (Obr. 6). Desky samotné mohou být mírně klínovité, aby se zabránilo vzniku interference mezi vnějšími plochami [7].

Vstupní světelná vlna dopadá a prochází první deskou. Po průchodu první deskou dopadá na druhou desku. Na této desce dochází k částečnému odrazu a částečnému průchodu světelné vlny. Odražená vlna dopadá na první desku, kde opět dochází

k částečnému odrazu a průchodu světelné vlny. Tento proces se neustále opakuje a výsledkem je mnohosvazková interference způsobena mnohonásobným odrazem na rozhraní dvou rovinných desek. Abychom na výstupu mohli pozorovat konstruktivní interferenci všech prošlých vln, musí být vzdálenost mezi deskami rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky dopadající světelné vlny.



Obr. 6: Schématické uspořádání Fabryova-Perotova interferometru

Tento interferometr (de facto rezonátor) je základním prvkem laserů, v závislosti na odraznosti ploch a tím jakosti rezonátoru se vyznačuje velkou frekvenční selektivitou. Používá se pro měření spektrálního složení optického záření a díky svojí schopnosti filtrovat určité vlnové délky. Jakožto rezonátor laseru může být navržen v různých konfiguracích, se zakřivením zrcadel pro dosažení optické stability [8].

#### 1.2.4 Laserové interferometry

Laserové interferometry jsou optické přístroje, které jako zdroj světla využívají laser. Takovéto interferometry se využívají především pro měření geometrických veličin nebo mohou sloužit jako referenční generátory přesně definovaných vzdáleností [8].

Základním typem pro měření vzdáleností je Michelsonův laserový interferometr, který jako zdroj světla používá laser – zdroj koherentního záření. Laser generuje světlo na vstupu interferometru, toto světlo dopadá na dělicí prvek (např. polopropustné zrcadlo, nebo častěji polarizující hranol) a vytváří tak měřicí a referenční svazek. Referenční svazek dopadá na fixní zrcadlo, odráží se od něj a dopadá zpět na dělicí prvek. Měřicí svazek dopadá na pohyblivé zrcadlo, opět se od něj odráží zpět a dopadá na dělicí prvek. V dělicím prvku dochází ke spojení referenčního a měřicího svazku a na výstupu

pozorujeme interferenci. Podle rozdílu délky ramen rozlišujeme na výstupu konstruktivní nebo destruktivní interferenci. Perioda, s jakou se tyto dvě limitní situace opakují, je polovina vlnové délky laserového záření. Tato podmínka vychází z faktu, že světlo, které prochází měřicí větví, prochází tímto prostorem 2x [8]. Střídání konstruktivní a destruktivní interference představuje inkrementální princip měření a je pozorovatelné potud, pokud rozdíl délky ramen interferometru nepřekročí koherenční délku laseru.

### **1.3 Detekční techniky pro vyhodnocení interferenční fáze**

Základní rozlišení laserového interferometru je dáno periodou mezi konstruktivní a destruktivní interferencí. V případě základního laserového interferometru je tato perioda dána polovinou vlnové délky laserového zdroje. V případě plynového He-Ne laseru, který má vlnovou délku 633 nm je perioda 316,5 nm. Toto primární rozlišení však v dnešní době, kdy nanotechnologie hýbou světem zdaleka nestačí, takže byly hledány cesty, jak jej dále vylepšit. Pokud potřebujeme toto rozlišení zvýšit, musíme laserový interferometr doplnit o elektronické, dnes již výhradně digitální zpracování interferenčního signálu [8].

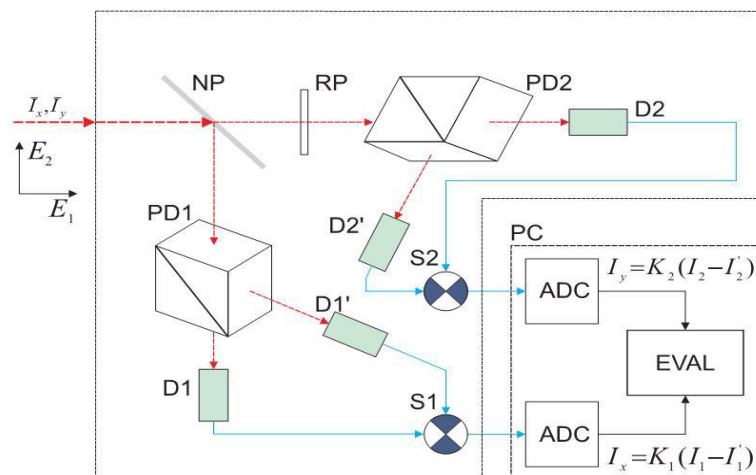
Další problém, který se u laserových interferometrů projevuje jako důsledek inkrementální povahy měření, je problém detekce směru pohybu měřícího zrcadla. Z periodicity světelné vlny nelze detekcí amplitudy interference určit, jestli se rozdíl ramen zvyšuje nebo snižuje. To je nutné řešit tzv. detekčními technikami pro vyhodnocení interferenční fáze. Tyto techniky můžeme rozdělit na dva principy. Prvním principem je homodynní detekce, kde spolu interferují dva laserové svazky o stejné optické frekvenci. Druhým principem je tzv. heterodynní detekce při této detekci spolu interferují dva svazky s různými optickými frekvencemi. V tomto případě není výsledkem interferenční vlna s konstantní interferenční fází, ale zánějový kmitočet [9, 10]. V následujícím textu se zaměřím pouze na princip homodynní detekce, kterou jsem využili v našem měření.



### 1.3.1 Homodynní detekce interferenční fáze

Schéma detekční jednotky je znázorněno na obr. 7. Předpokladem je interferometr s dělicím prvkem v podobě polarizujícího hranolu, kde je referenční svazek polarizován v rovině kolmé vzhledem k měřicímu svazku. Na výstupu z interferometru jsou oba svazky souosé, ale neinterferují. Do jednotky tak vstupují oba svazky s navzájem kolmými polarizačními rovinami a jsou rozděleny v poměru 1:1 nepolarizujícím děličem NP do dvou detekčních větví. Odražená vlna dopadá na polarizující dělič PD1, který je natočen vzhledem k rovině polarizace o úhel  $45^\circ$ . To vede k průmětu rozdílných polarizací do dvou polarizačních rovin. Teprve zde dochází k interferenci a na výstupu fotodetektoru D1 lze vyhodnotit amplitudu interference. Na detektoru D1' dochází také k interferenci, ale s fázovým posunem o  $180^\circ$ . Vypočte-li se pomocí rozdílového zesilovače rozdíl detekovaných amplitud z fotodetektoru D1 a D1', na výstupu tohoto zesilovače získáme sinusový průběh amplitudy interference  $I_x$  s nulovou střední hodnotou [8].

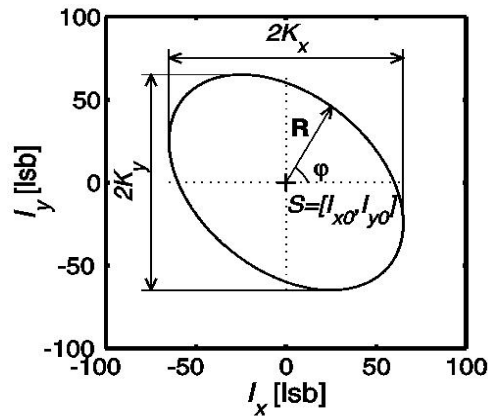
Detekce vlny procházející nepolarizujícím děličem NP je skoro shodná s předchozím postupem. Rozdíl je v tom, že za nepolarizující dělič je zařazena zpožďovací deska  $\lambda/4$ . Tato deska způsobí, že jedna z vln je fázově posunuta o  $\lambda/4$ . To způsobí, že na výstupu rozdílového zesilovače S2 vzniká signál  $I_y$ . Tento signál je shodný se signálem ze zesilovače S1, ale fázově posunutý o úhel  $90^\circ$  [8].



Obr. 7 Schéma principu homodynní detekce, převzato z [8]

Pokud signály  $I_x$  a  $I_y$  vyneseme do kartézských souřadnic, při změně optické dráhy v měřicí větvi interferometru lze sledovat v ideálním případě kružnici, ve skutečnosti

obecnou kuželosečku, kružnici se blíží. Tu můžeme parametrizovat do polárních souřadnic. Úhel  $\varphi$  vyjadřuje změnu optické dráhy v měřící větvi laserového interferometru (Obr. 8) [11].



Obr. 8 Vyobrazení signálu z detekční jednotky, převzato z [8]

## 1.4 Optický rezonátor

Optickým rezonátorem se rozumí zařízení, které je schopné hromadit, nebo na jistou dobu udržet optické záření v omezené oblasti prostoru. Dvě planoparalelní zrcadla, která tvoří Fabryho-Perotův rezonátor (F-P rezonátor), vymezují oblast prostoru, ve kterém dochází ke kumulaci energie, pokud směr šíření a frekvence vln vyhovují rezonančním podmínkám. Optické rezonátory obecně mohou být složeny z odrazných ploch různých tvarů.

V žádném reálném rezonátoru však není možné energii uchovat navždy. Pokles energie v nebuzeném rezonátoru určují především jeho vlastní ztráty. Necht'  $U(t)$  je celková energie záření o frekvenci  $\nu$  uvnitř rezonátoru vyjádřená časem  $t$ . Necht' v čase  $t = 0$  je v rezonátoru energie  $U(0)$ . Časový pokles může být zpravidla popsán exponenciálním zákonem:

$$U = U(0)e^{-\frac{t}{\tau_c}}. \quad (8)$$

Parametr  $\tau_c$  je vlastně časový interval, za který energie uvnitř rezonátoru klesne na hodnotu  $U(0)/e$ , to je relaxační doba energie v rezonátoru, někdy se nazývá *dobou života fotonu v rezonátoru*. Na základě elementárních představ o F-P rezonátoru, tvořeném zrcadly s reflektancemi (odraznostmi)  $R_1$  a  $R_2$ , lze nahlédnout, že energie  $U(0)$

soustředěná uvnitř poklesne o hodnotu  $\Delta U$  za dobu oběhu rezonátorem  $\Delta t = 2L/c$ . Z toho je možné vyjádřit  $\tau_c$  jako

$$\tau_c = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - R_1 R_2}. \quad (9)$$

Bezrozměrná veličina  $Q = 2\pi\nu_r\tau_c$ , kde  $\nu_r$  je rezonanční frekvence, se nazývá *činitelem jakosti* rezonátoru. Je mírou schopnosti optického rezonátoru uchovat energii. Čím menší jsou ztráty v rezonátoru, tím bývá  $\tau_c$  větší a tím větší je i činitel jakosti rezonátoru  $Q$ . Množina rezonanční frekvencí  $\nu_r$  je množinou diskrétních hodnot.

Idealizovaný F-P rezonátor je prostor uzavřený nekonečnými zrcadly. Ztráty energie z rezonátoru jsou dány jen transmitancí (propustností) zrcadel. V praxi však mají zrcadla jen konečné rozměry. Prostor, v němž dochází k soustředění energie optického záření, není uzavřen. Rezonátor označujeme jako *otevřený* [12].

#### 1.4.1 Otevřený rezonátor

Mají-li odrazné plochy konečný rozměr, dochází k úniku části energie kolem zrcadel. V laserech se používají dvojice zrcadel, ve kterých je obvykle jedna plocha vysoce odrazná, druhá plocha částečně propustná sloužící k vyvedení energie z rezonátoru. Výkon záření prostupující zrcadlem představuje tzv. *činné ztráty* rezonátoru. Částečně odraznou plochu označujeme jako *výstupní zrcadlo* otevřeného rezonátoru.

Základními rozměry otevřeného rezonátoru jsou vzdálenost  $L$  odrazných ploch (zrcadel) a příčný rozměr zrcadel. Je-li příčný rozměr podstatně menší než vzdálenost, dochází k významnému úniku energie optického záření z otevřeného rezonátoru. Ztráty energie takto vznikající se nazývají *difrakční ztráty*.

Zrcadla rezonátoru mohou mít různé geometrické tvary. Zvláštními případy jsou *planparalelní rezonátory*, kdy obě odrazné plochy jsou rovinnými zrcadly (od F-P rezonátoru se liší tím, že příčné rozměry jsou konečné) a *sférické rezonátory*, kdy plochy jsou částmi kulových povrchů (někdy s pravoúhlo, častěji s kruhovou aperturou).

Difrakční ztráty jsou dány skutečností, že apertury (vnější rozměry) rezonátorových zrcadel a dalších optických komponent mají malé rozměry. Záření, které postupuje směrem k zrcadlu, částečně zrcadlo „obtéká“ a nevrací se zpět. Difrakční ztráty otevřeného rezonátoru rostou, pokud klesá příčný rozměr zrcadla  $a$ , nebo roste délka  $L$

rezonátoru. Jsou také tím větší, čím je větší vlnová délka  $\lambda$ . Proto, aby difrakční ztráty byly zanedbatelné, musí platit

$$N_F = \frac{a^2}{4\lambda L} \gg 1 \quad (10)$$

Bezrozměrný parametr  $N_F$  se nazývá *Fresnelovým číslem*. Velikost Fresnelova čísla je kritériem velikosti difrakčních ztrát rezonátoru [12].

#### 1.4.2 Sférické otevřené rezonátory

Nejčastěji používané otevřené rezonátory jsou sférické rezonátory, tvořené dvěma kulovými plochami s poloměry  $r_1$  a  $r_2$ . Jejich zvláštními případy jsou:

- planoparalelní  $r_1 = r_2 = \infty$
- konfokální  $r_1 + r_2 = 2L$
- koncentrický  $r_1 + r_2 = L$
- hemisférický  $r_1 = L, r_2 = \infty$ .

Otevřené sférické rezonátory jsou definovány průměry apertur  $a_1, a_2$ , poloměry křivosti zrcadel  $r_1, r_2$  a vzdálenosti zrcadel  $L$ . Existují tři podobnostní bezrozměrné parametry  $N_F, G_1$  a  $G_2$ , jimiž jsou charakterizovány difrakční ztráty:

$$N_F = \frac{a_1 a_2}{4\lambda L} \quad (11)$$

$$G_1 = \left( \frac{a_1}{a_2} \right) \left( 1 - \frac{L}{r_1} \right) \quad (12)$$

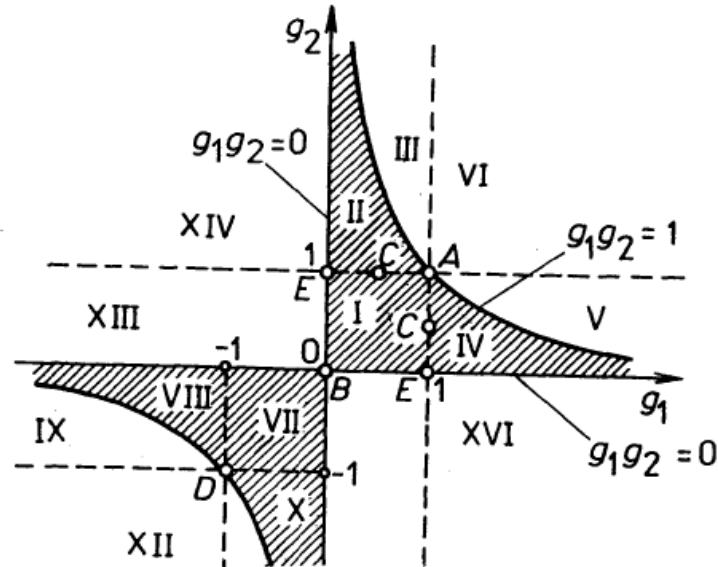
$$G_2 = \left( \frac{a_2}{a_1} \right) \left( 1 - \frac{L}{r_2} \right). \quad (13)$$

V závislosti na velikosti difrakčních ztrát dělíme otevřené rezonátory na *stabilní* a *nestabilní*. Stabilním je ten rezonátor, ve kterém záření při mnohonásobném průchodu rezonátorem mezi zrcadly tam a zpět neztrácí podstatnou část své energie. Pro zařazení konkrétního sférického rezonátoru mezi stabilní nebo nestabilní lze s výhodou provést pomocí diagramu stability. Diagram stability (Obr. 9), mají-li zrcadla stejně velké apertury je diagram v rovině bezrozměrných parametrů  $g_1$  a  $g_2$ :

$$g_1 = 1 - \frac{L}{r_1} \quad (14)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}. \quad (15)$$

Rezonátor je stabilní pokud platí:  $0 < g_1 g_2 > 1$ .



Obr 9: Diagram stability, převzato z [11]

V případě, že  $g_1 g_2 = 0$  nebo  $1$ , je rezonátor na hranicích stability. V uvedeném diagramu stability každý bod odpovídá některému sférickému rezonátoru. Bod  $A$  reprezentuje rezonátory tvořené dvěma rovinnými zrcadly (planparalelní rezonátory), pro které  $g_1 = g_2 = 1$ . Bod  $0$  odpovídá konfokálnímu rezonátoru tvořenému dvěma konkávními zrcadly stejné křivosti, pro kterou platí vztah  $r_1 = r_2 = L$ ,  $g_1 = g_2 = 0$  [12].

### 1.4.3 Stojatá vlna

Existence optické stojaté vlny byla poprvé prokázána Wienerem a poté využita v různých experimentálních měřeních. Stojatá vlna se využívá v rezonátorech.

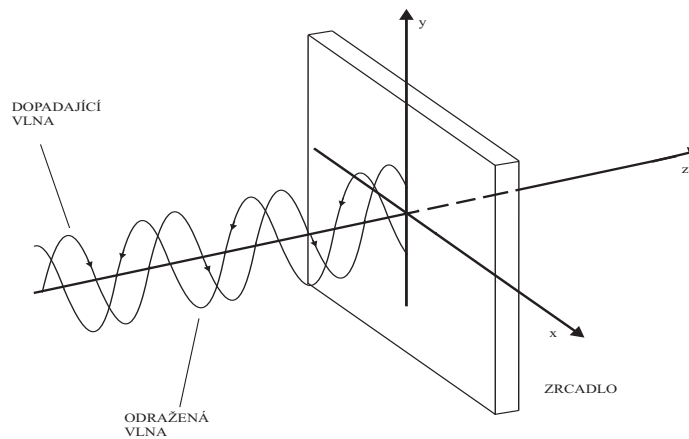
Optickou vlnu můžeme popsat pomocí intenzity elektrického pole  $E_1$ , která je dána vztahem

$$E_1 = A_1 e^{j(kz - \omega t)}, \quad (16)$$

kde  $k = 2\pi/\lambda$  a  $\varpi = 2\pi/T$ . Tato vlna dopadá kolmo na odraznou rovinu zrcadla a dochází k téměř dokonalému odrazu s posunem fáze o  $\pi$  (Obr. 10). Intenzita  $E_2$  odražené vlny je dána vztahem

$$E_2 = A_2 e^{j(-kz - \varpi t + \pi)}, \quad (17)$$

odražená vlna se šíří v záporném směru osy  $z$ . K interferenci bude docházet mezi dvěma vlnami v opačném směru šíření.



Obr.10 *Vznik stojaté vlny na rovinném zrcadle*

Fotoelektrický jev světelné vlny je založen na její intenzitě  $I$ , kterou můžeme vyjádřit pomocí vztahu

$$I = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 c}{2} EE^*, \quad (18)$$

kde  $E^*$  představuje konjugovanou komplexní intenzitu pole  $E$ . Z tohoto důvodu můžeme intenzitu stojaté vlny vyjádřit vztahem

$$I_{sw} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 c}{2} (E_1 + E_2)(E_1^* + E_2^*) \quad [13]. \quad (19)$$

## 1.5 Index lomu vzduchu a jeho vliv na interferometrická měření

Přesnost měření délek interferometrem je omezena řadou vlivů, jako je stabilita optické frekvence laseru, kvalita optických prvků, geometrie sestavy, mechanická

tuhost, atd. Při měření v atmosférických podmínkách však největší roli hraje variabilita indexu lomu vzduchu. Je to bezrozměrná veličina, určující relativní změnu rychlosti šíření světla v daném prostředí vzhledem k vakuu. Při průchodu světla vzduchem dochází ke změně vlnové délky, která je dána vztahem

$$\lambda = \lambda_0 \frac{c_{air}}{c}, \quad (20)$$

kde  $\lambda_0 = c/\nu$  je vlnová délka ve vakuu,  $c = 299\,792\,458$  m/s je rychlost světla ve vakuu,  $c_{air}$  je rychlost světla ve vzduchu. Index lomu vzduchu je dán vztahem  $n = c/c_{air}$ . Hodnota indexu lomu vzduchu je přibližně rovna 1. Rozdíl je patrný až na čtvrtém desetinném místě. Hodnota indexu lomu závisí na mnoha veličinách. Nejvíce je to teplota  $t$ , tlak vzduchu  $p$ , relativní vlhkost vzduchu  $RH$ , koncentrace  $\text{CO}_2$  a vlnočet  $\sigma = \lambda_0^{-1} [\mu\text{m}^{-1}]$ . Index lomu vzduchu v ose svazku interferometru není homogenní, a je časově proměnný. Tento fakt je způsoben prouděním vzduchu, při kterém dochází ke změně atmosférických veličin [14].

Nejpoužívanější empirickým vztahem pro stanovení indexu lomu vzduchu z environmentálních dat je Edlénova formule. Bengt Edlén svoji studii, která je týkala indexu lomu vzduchu, zveřejnil v roce 1966 [15]. Jeho vyjádření obsahovalo i disperzní člen  $K_\lambda$ .

Edlénův disperzní vzorec pro standardní vzduch (suchý) s koncentrací  $\text{N}_2$  78,09%,  $\text{O}_2$  20,95%,  $\text{CO}_2$  0,03% při teplotě  $15^\circ\text{C}$  a tlaku 101,325 kPa má následující tvar:

$$(n-1)_s \cdot 10^8 = 8442,13 + 2406030 \cdot (130 - \sigma^2)^{-1} + 15997 \cdot (38,9 - \sigma^2)^{-1}, \quad (21)$$

kde  $n$  je index lomu vzduchu a  $\sigma$  vlnočet ve vakuu.

Edlén vyjádřil index lomu suchého vzduchu s teplotou  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ] a tlakem  $p$  [kPa] ve tvaru součinu disperzního a hmotnostního členu:

$$(n-1)_{ip} = K_\lambda D_{ip}. \quad (22)$$

Disperzní člen nezávisí na tlaku a teplotě, je úměrný výrazu  $(n-1)_s$ , určenému rovnicí (12) a  $D_{ip}$  je člen hustoty, který je funkcí tlaku a teploty:

$$D_{tp} = p \cdot (1 + \varepsilon_t \cdot p) / \left\{ (1 + \alpha \cdot t) \cdot \left[ 1 - (n-1)_{tp} / 6 \right] \right\}, \quad (23)$$

kde  $\alpha = 1/273,15$ ,  $\varepsilon_t$  je faktor zohledňující neideálnost plynu a  $t$  je teplota v [°C]. Pro  $\varepsilon_t$  odvodil:

$$\varepsilon_t = (5,625 - 0,09781 \cdot t) \cdot 10^{-6}. \quad (24)$$

Pro člen hustoty po úpravách (15) dostáváme výraz

$$D_{tp} = p \cdot \left[ 1 + p(6,2092 - 0,09976 \cdot t) \cdot 10^{-6} \right] / (1 + 0,003661 \cdot t). \quad (25)$$

Pro člen zohledňující obsah CO<sub>2</sub> platí:

$$(n-1)_x = [1 + 0,0054 \cdot (x - 0,03)] \cdot (n-1)_s. \quad (26)$$

Pro člen obsahující tlak vodních par platí vztah:

$$n_{tp_h} = n_{tp} - p_h (42,922 - 0,343 \cdot \sigma^2) \cdot 10^{-8}. \quad (27)$$

Ze vztahu (21), (22) a (25) dostáváme Edlénův vzorec pro suchý vzduch

$$(n-1)_{tp} = p \cdot (n-1)_s \frac{[1 + p \cdot (6,2092 - 0,09976 \cdot t) \cdot 10^{-6}]}{[96,09626 \cdot (1 + 0,003661 \cdot T)]} \quad (28)$$

Konstanta ve jmenovateli 96,09626 je rovna hodnotě  $D_{tp}$  pro normální vzduch.

Pro vlhký vzduch s odlišným obsahem CO<sub>2</sub> můžeme napsat ve zkráceném tvaru takto:

$$(n-1)_{tp_{xh}} = [(n-1)_{tp} + n_{tp_h} - n_{tp}] \cdot (n-1)_x / (n-1)_s. \quad (29)$$

Celkovou nejistotu vztahu Edlén odhadl na  $5 \cdot 10^{-8}$ . Později byla v jeho vztahu nalezena chyba. Bylo zjištěno, že průměrná koncentrace CO<sub>2</sub> ve standardním vzduch není 0,03%, jak uvedl Edlén, ale 0,0444%. Edlénova formule prošla řadou dalších zpřesnění a dnes se hovoří o tzv. *modifikované Edlénově formuli*, která za normální koncentrace CO<sub>2</sub> a vlnové délce 633 nm má tento tvar:

$$(n-1) \cdot 10^6 = 2,87782 \cdot p \cdot \frac{[1 + p \cdot (6,01 - 0,0972) \cdot 10^{-6}]}{(1 + 0,003661 \cdot t)} - 6,49 \cdot h \cdot (100050 + 2,3 \cdot t + 3,1 \cdot p) \cdot \exp\left[\frac{-5321}{t + 273,15}\right]. \quad (30)$$



## II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2 Úvod do problematiky

Proč se vlastně zabýváme tímto problémem je, že při interferometrických měřeních je hlavním zdrojem nejistoty vliv indexu lomu vzduchu. Měření jsou zatížena jak nejistotou určení jeho hodnoty, tak variacemi způsobenými turbulencí vzduchu a nerovnoměrným teplotním polem v prostoru měření. Index lomu ovlivňuje vlnovou délku světla tak, že vlnová délka měřená ve vakuu je menší než vlnová délka měřená ve vzduchu. Můžeme to vyjádřit vztahem

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_{prost.}}. \quad (32)$$

V případě, kdy při měření použijeme současně používaný koncept interferometrického měření je index lomu vzduchu stanoven na základě parametrů atmosféry a jeho hodnota je vypočtena z empirické, tzv. Edlénovy rovnice, která je popsána v předcházející kapitole. Přesnost měření se v takovémto případě pohybuje v řádech  $10^{-6}$ , ne proto, že by fyzikální vlastnosti vzduchu nebylo možné změřit náležitě přesně, ale z důvodů nehomogenity, viz výše. Tato hodnota je celkem nízká ve srovnání se stabilitou moderních laserových etalonů optických frekvencí, jejichž nejistota se pohybuje až na úrovni  $10^{-13}$ .

Při kalibraci a porovnávání interferometrů se v laboratorních podmínkách využívá refraktometr. Všechna měření indexu lomu vzduchu, provedena pomocí refraktometru nebo výpočtem z Edlénovy rovnice jsou limitována fluktuacemi vzduchu podél a v okolí laserového svazku a teplotními gradienty, především ve svislém směru.

Přesnost měření indexu lomu pomocí refraktometrie je v řádech  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  za ideálních podmínek s úplným vyloučením proudění vzduchu. Hodnota přesnosti v řádech  $10^{-8}$  je limitem pro stanovení indexu lomu vzduchu v laboratorních podmínkách.

## 2.1 Závislost vlnové délky laserového zdroje

U tradičního interferometru pro měření délky je optická frekvence  $\nu$  laserového zdroje konstantní a jeho vlnová délka  $\lambda$  je závislá na indexu lomu vzduchu  $n$ , rychlosti světla  $c$  a konstantní frekvenci  $\nu$  (Obr. 11). Tuto závislost můžeme vyjádřit vztahem

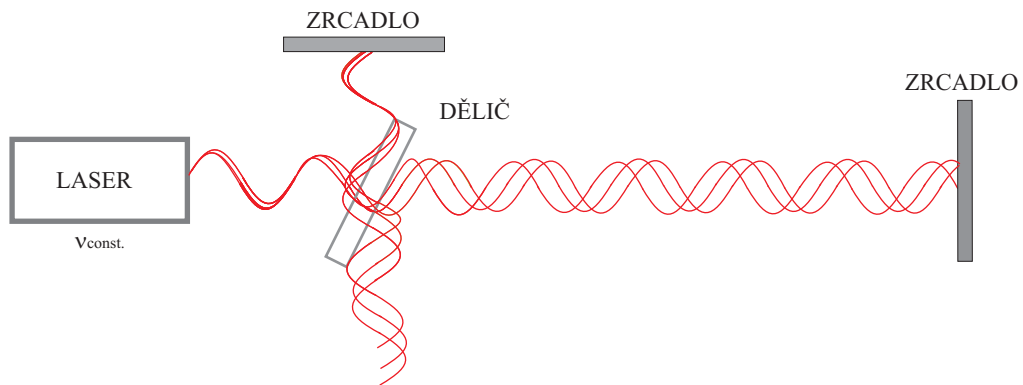
$$\lambda = \frac{1}{n} \times (c / \nu_{const.}). \quad (33)$$

Cílem této práce je ověřit koncept, kdy je stabilizována vlnová délka v atmosféře. Jak je naznačeno na obr. 12., V situaci s konstantní délkou  $L$  měřícího ramene již optická frekvence  $\nu$  laserového zdroje není konstantní, ale je závislá na rychlosti světla  $c$ , proměnném indexu lomu  $n$  a vlnové délce  $\lambda$ . Tuto závislost můžeme vyjádřit vztahem

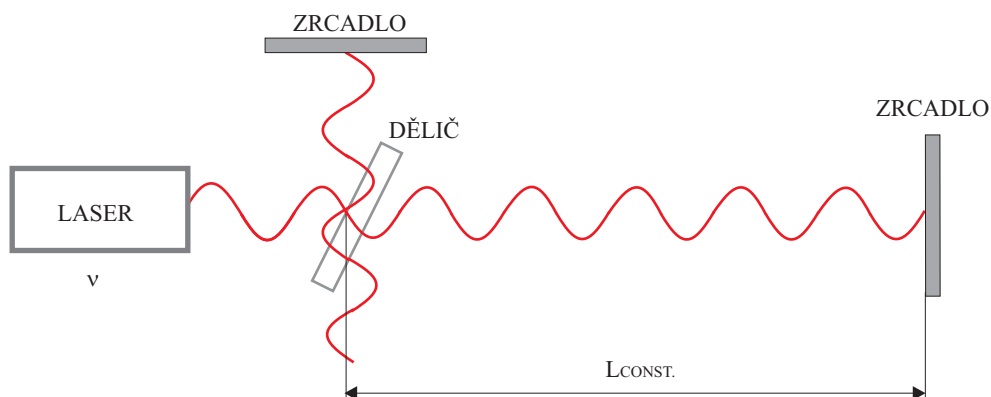
$$\nu = \frac{1}{n} \times (c / \lambda). \quad (34)$$

Vlnová délka je dána vztahem

$$\lambda = N \times L_{const.} \quad (35)$$



Obr. 11 Schéma klasického interferometru

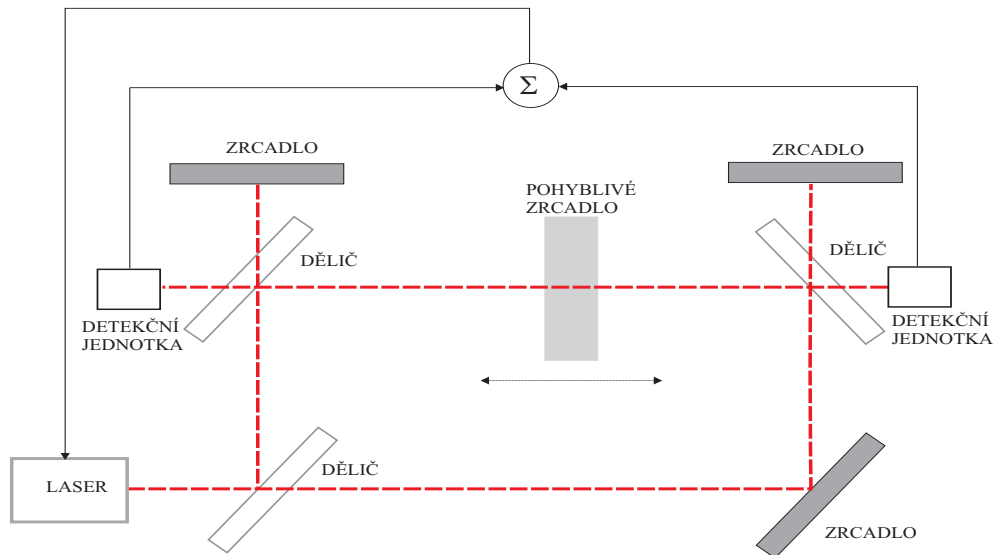


Obr. 12 Schéma interferometru s konstantní délkou

## 2.2 Interferometr s kompenzací indexu lomu vzduchu

Na obr. 13 je principiální schéma interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu. Tento interferometr se odlišuje od běžných interferometrů tím, že vlnová délka laserového zdroje není odvozena od optické frekvence stabilizovaného laseru ale od pevné mechanické délky, která je současně měřicím rozsahem celého systému.

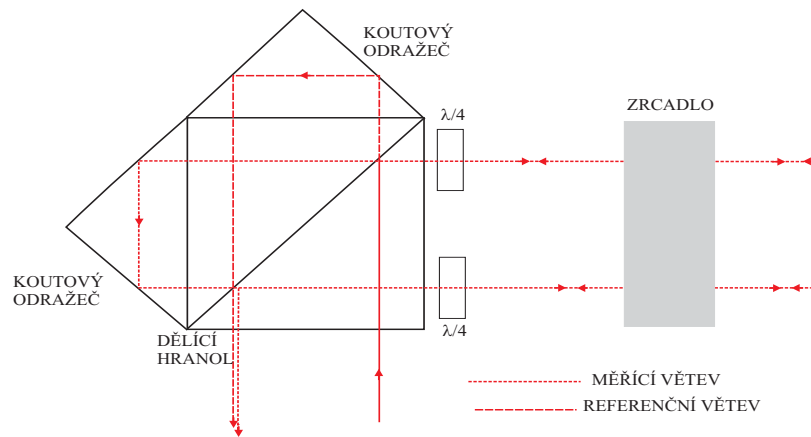
Sestava se skládá ze zdroje laserového záření, ze dvou interferometrických jednotek, rovinného zrcadla a dále z polopropustného a odrazného zrcadla. Rovinné zrcadlo je mezi interferometrickými jednotkami pohyblivé a jeho posuv představuje odměřovanou vzdálenost. Změnu polohy rovinného zrcadla zaznamenávám pomocí detekčních jednotek. Jelikož se oba signály z detekčních jednotek sčítají, je výsledná mechanická délka konstantní. Od této mechanické délky je odvozena vlnová délka laserového zdroje.



Obr. 13 *Principiální schéma interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu*

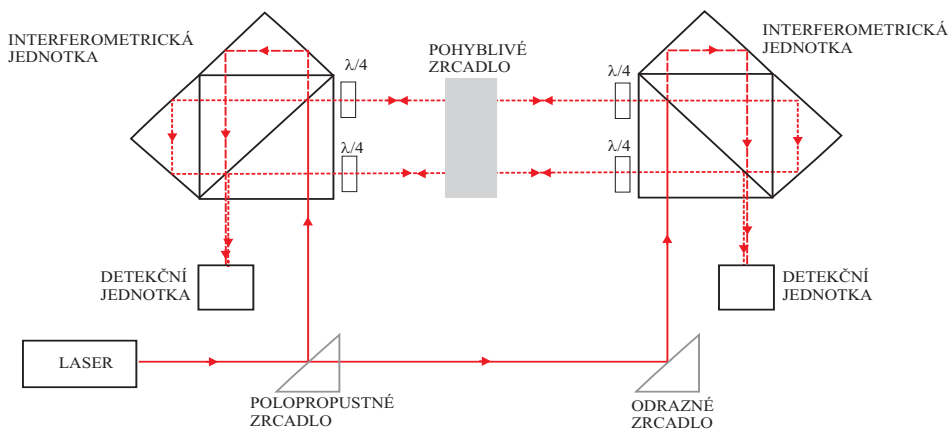
### 3 Sestava s interferometrickými jednotkami s rovinným zrcadlem

Pro první sestavení tohoto interferometru jsem použila interferometrickou jednotku se čtyřnásobným průchodem určenou pro měření odrazem od rovinného zrcadla. Schéma jednotky je znázorněno na obr. 14. Jednotka se skládá z děličící hranolu, který je vyroben z optického skla SF 14 a má rozměry 15 mm x 15 mm x 15 mm, dvou koutových odražečů z optického skla BK 7 a dvou čtvrtvlnných zpožďovacích desek ( $\lambda/4$  desek). Celá jednotka se nachází v titanovém pouzdře. Titanové pouzdro bylo zvoleno z toho důvodu, jelikož titan má podobný koeficient teplotní roztažnosti jako optické sklo SF 14. Teplotní koeficient roztažnosti titanu je  $9,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a optického skla SF 14 je  $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Konstrukčním problémem této optické konfigurace je to, že není plně teplotně kompenzovaná, to znamená, že referenční a měřicí větve svazku ve skle jsou různě dlouhé.

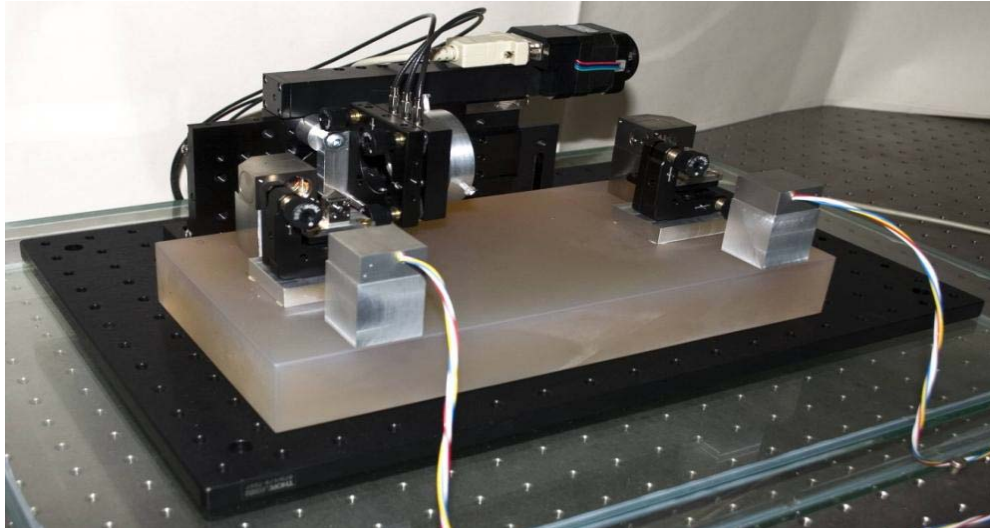


Obr. 14 Schéma interferometrické jednotky

Na obr. 15 je znázorněna interferometrická sestava s dvěma interferometrickými jednotkami. Jako zdroj laserového záření jsem použila plynový He-Ne laser o vlnové délce 633 nm. Celá sestava (Obr. 16) je umístěn na desce ze Zeroduru, třídy „0“ (od firmy Schott), která má rozměry 300 mm x 40 mm x 150 mm. Tento materiál se vyznačuje malou teplotní roztažností garantovanou pod  $1 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$  v rozmezí 0 – 50 °C. Zrcadlo umístěné mezi interferometrickými jednotkami je také ze Zeroduru.



Obr. 15 Sestava interferometru 1



Obr. 16 První sestava interferometru, převzato [16]

### 3.1 Nastavení interferometru pomocí čtyřkvadrantního detektoru

K úhlovému nastavení laserového svazku a ostatních optických komponent jsem použila čtyřkvadrantní detektor (4Q detektor). Při nastavování jsem se zaměřila na dva hlavní druhy geometrických chyb, které ovlivňují interferometrická měření. První chybou je tzv. kosinová chyba a druhá se nazývá tzv. Abbeho chyba.

#### 3.1.1 Kosinová chyba

Úhlovou odchylku svazku od měřicí osy nazýváme kosinová chyba. V tomto případě svazek není rovnoběžný s osou měření, ale úhlově odchýlen. Kosinová chyba je dána rozdílem  $M - L$ , kde  $M$  je měřená vzdálenost a  $L$  je skutečná vzdálenost. Měřenou vzdálenost  $M$  určíme pomocí vztahu

$$M = L \cdot \cos \theta, \quad (36)$$

kde  $\theta$  je úhel odklonu svazku od osy měření.

### 3.1.2 Abbeho chyba

Při této chybě se od sebe přímo liší skutečná a měřená dráha v důsledku různosti osy pohybu a osy měření. Tato chyba může být způsobena např. náklonem zrcadla, které se nepohybuje kolmo k ose. Abbeho chybu můžeme určit pomocí vztahu

$$\varepsilon = L \cdot \tan \beta, \quad (37)$$

kde  $\varepsilon$  je rozdíl měřené a skutečné dráhy a  $\beta$  je úhel náklonu zrcadla.

### 3.1.3 Princip 4Q detektoru

Pro eliminaci úhlových chyb, které jsou zmíněny v předchozích odstavcích, jsem použila 4Q detektor. Detektor slouží k nastavení rovnoběžnosti laserového svazku, jeho citlivost je asi 1  $\mu\text{m}$ . Rozlišení detektoru je ovlivněno šumem, odchylkami gaussovského profilu svazku a jeho vlastními geometrickými chybami.

Detektor je rozdělen na čtyři kvadranty, jeho celkový průměr je 5 mm. Při dopadu laserového svazku o průměru cca 3 mm mimo střed detektoru vzniká rozdílový signál. Tento signál je zpracován v počítači a pomocí programovacího prostředí „LabVIEW“ pozorují odchýlení laserového svazku. Odchýlení pozorují v ose  $x$  a  $y$ . Odchylna laserového svazku v ose  $x$  je dána součtem pravých a levých kvadrantů a následným odečtením těchto součtů. Odchylna v ose  $y$  je dána součtem horních a spodních kvadrantů a jejich následným odečtením.

#### 3.1.3.1 *Eliminace kosinové chyby*

K odstranění této geometrické chyby jsem použila 4Q detektor, který jsem umístila mezi interferometrické jednotky na místo pohyblivého zrcadla. Detektor jsem upevnila do držáku, který je nastavitelný úhlově ve dvou osách a připevnila jsem ho k motorickému posuvu. Cílem snažení bylo, aby měřicí laserový svazek dopadal při posuvu vždy do středu detektoru. Jinými slovy jsem se snažila o to, aby měřicí svazek byl rovnoběžný s osou měření.

K tomuto nastavení jsem použila dva 4Q detektory a dvě zrcadla, která jsou umístěna před interferometrickými jednotkami na justážních stolcích a jejich úkolem je směřovat laserový svazek do interferometrických jednotek. Justážní stolec je možné úhlově nastavovat ve dvou osách.

Postup eliminace kosinové chyby jsem po konzultaci s vedoucím práce zvolila iterační, pomocí motorického posuvu jsem měnila postupně polohy 4Q detektorů. Ve výchozí poloze se 4Q detektor nachází v těsné blízkosti interferometrické jednotky a pomocí polohovacího mechanismu držáku detektoru jsem nastavila detektor tak, aby laserový svazek dopadal do jeho středu. Ve druhé poloze je 4Q detektor v maximální vzdálenosti od interferometrické jednotky. Nyní jsem k nastavení použila šrouby na justážním stolku zrcadla a úhlově jsem nasměrovala laserový svazek do středu detektoru. Tento postup jsem několikrát opakovala, až jsem docílila minimální nebo ještě lépe nulové odchylky laserového svazku od středu detektoru během celé dráhy posuvu.

### **3.1.3.2      *Eliminace Abbeho chyby***

Abbeho chyba se v mojí konfiguraci projevovala především v podobě úhlové nestability zrcadla při posuvu. Plné zachování Abbeho principu (sesouhlasení měřicího svazku s osou posuvu) nebylo konstrukčně možné. K potlačení této chyby jsem použila opět dva 4Q detektory, které jsou v nastavitelných držácích. V tomto případě jsem je umístila na výstup interferometrických jednotek. Cílem snažení bylo, aby se laserový svazek dopadající na detektor nevychyloval při posuvu zrcadla. K nastavování jsem dále využila posuvné zrcadlo, které je mezi interferometrickými jednotkami upevněno ve stavitelném držáku. Polohu zrcadla lze měnit pomocí motorického posuvu. V poloze, kdy se zrcadlo nachází v těsné blízkosti interferometrické jednotky jsem pomocí šroubů na držáku detektoru nastavila jeho polohu tak, aby laserový svazek dopadal do jeho středu. V poloze, kdy je zrcadlo v maximální vzdálenosti od interferometrické jednotky jsem použila šrouby na držáku zrcadla a nasměrovala jsem svazek zpět do středu 4Q detektoru. Tento postup jsem opět několikrát opakovala.



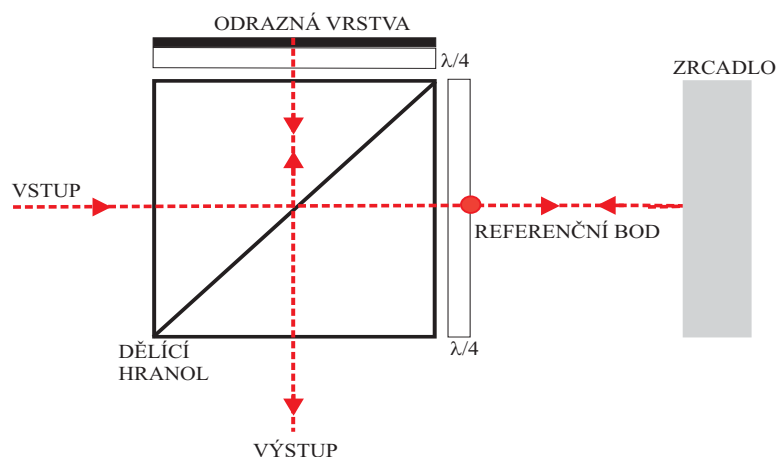
### 3.1.3.3 *Výsledky potlačení úhlových chyb*

Výsledkem úsilí zaměřeného na eliminaci všech úhlových chyb bylo, že se dařilo dosáhnout uspokojivých výsledků vždy jen u jedné interferometrické jednotky. V druhém případě byla odchylka laserového svazku v nejlepším případě ose  $x$  592 nm a v ose  $y$  1079 nm, měřeno 4Q detektorem. Důvodem byla jednak přílišná složitost interferometrických jednotek se čtyřnásobným průchodem a jejich vlastní úhlové odchylky a také malá přesnost a úhlová stabilita posuvu.

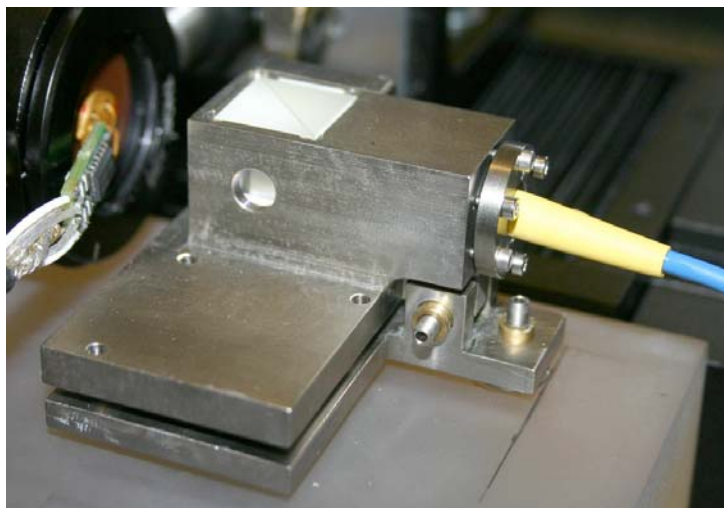
He-Ne laser, který jsem měla k dispozici, disponoval plynulým přeladěním optického kmitočtu 900 MHz, což postačovalo na pokrytí změny indexu lomu odpovídající změně teploty o cca 1K. Abych prokázala efekt stabilizace vlnové délky s tímto omezeným rozsahem, bylo nutné potlačit chyby interferometru pod úroveň alespoň 10 x menší, než je změna optické délky této změně odpovídající, tj. 210 nm. Výše uvedené stranové odchylky způsobovaly ovšem zdroj chyb 1230 nm, což bylo příliš. To bylo důvodem ke změně koncepce a návrhu nových, opticky jednodušších a také teplotně kompenzovaných interferometrických jednotek.

## 4 **Sestava s teplotně kompenzovanými interferometrickými jednotkami**

Ověření principu kompenzace vlivu změn indexu lomu si vyžadovalo nový koncept. Původní jednotku se čtyřnásobným průchodem jsem nahradila novou, speciálně pro tento účel navrženou interferometrickou jednotkou, která je opticky jednodušší a teplotně kompenzovaná (Obr. 17). Jednotka se skládá z dělicího hranolu a dvou  $\lambda/4$  desek. Dělicí hranol je opět vyroben z optického skla SF 14 a má opět rozměry 15 mm x 15 mm x 15 mm. Na  $\lambda/4$  desce, která je v referenční větvi, je nanесena vysoce odrazná vrstva. Obě větve jak měřící, tak i referenční jsou ve skle stejně dlouhé a princip díky teplotní kompenzace představuje stejnou změnu délky obou větví v případě dilatace všech optických komponentů, je-li jednotka vázána na referenční rám v naznačeném referenčním bodě. Jednotka spolu s kolimátorem se nachází v titanovém pouzdře, opět z důvodu téměř shodného koeficientu teplotní roztažnosti s materiálem hranolu. Lze ji úhlově nastavovat ve dvou osách (Obr. 18).

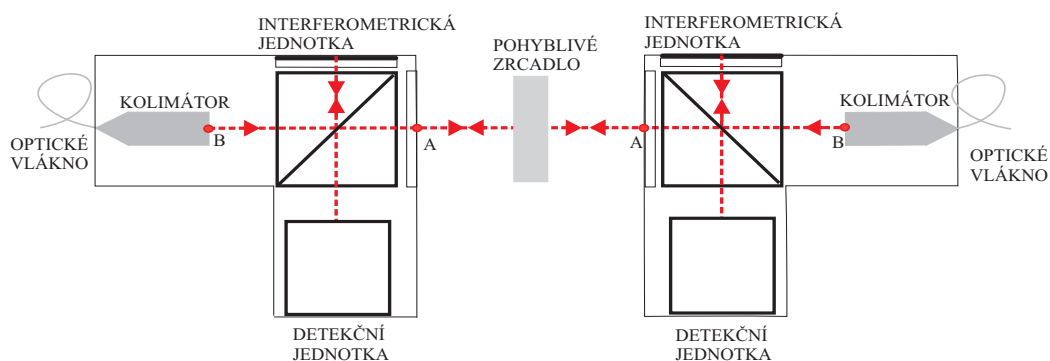


Obr.17 *Interferometrická jednotka – teplotně kompenzovaná*

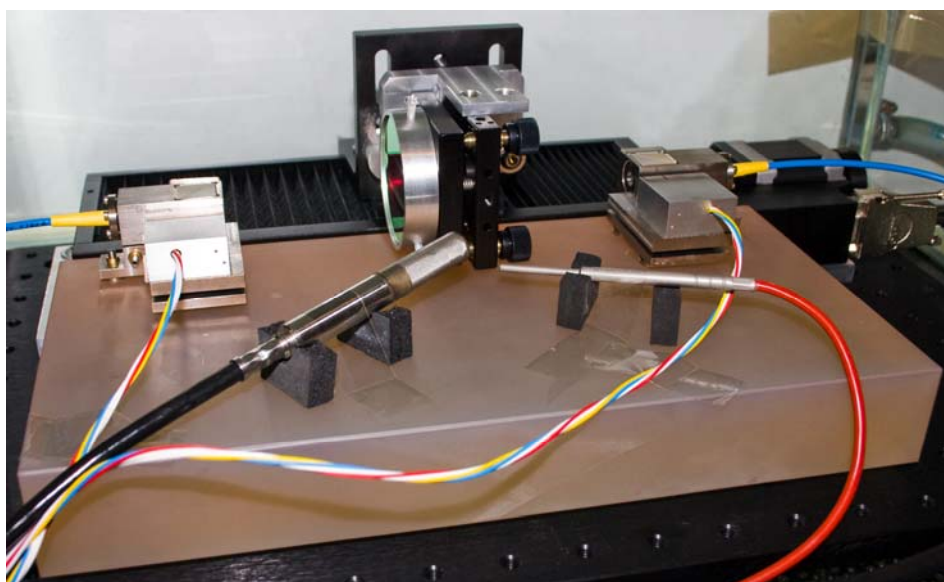


Obr. 18 *Interferometrická jednotka spolu kolimátorem v titanovém pouzdře*

Celé uspořádání interferometru jsem pozměnila (Obr. 19). Hlavní rozdíl nastal ve vedení laserového svazku. Nyní je laserový svazek veden optickým vláknem a pomocí splitteru se rozděluje do dvou výstupů. Jako zdroj laserového záření jsem použila opět plynový He-Ne laser. Kolimátor spolu s interferometrickou jednotkou jsem umístila na desku, která je úhlově stavitelná. Kolimátor s interferometrickou jednotkou lze nastavovat úhlově vzhledem k bodu „A“ a samotný kolimátor je stavitelný vzhledem k bodu „B“ také úhlově. Celá sestava na obr. 20 je opět umístěna na desce ze Zeroduru. Měřící rozsah interferometru je 10 cm.



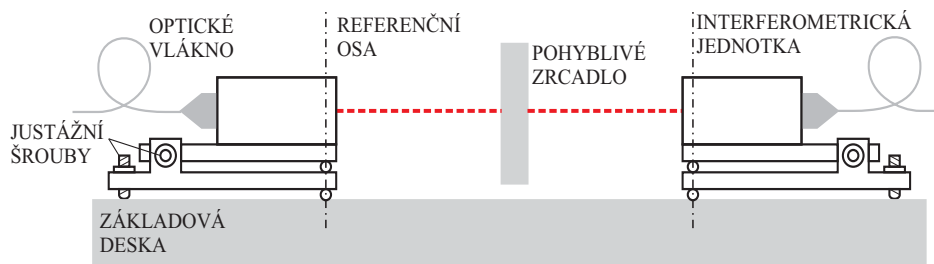
Obr. 19 Schéma interferometrické sestavy 2



Obr. 20 Druhá sestava interferometru

#### 4.1 Teplotní kompenzace interferometrické jednotky

Teplotní kompenzace interferometrické jednotky je vztažena k referenčnímu bodu. Přes tento bod je jednotka spojena se základovou deskou pomocí kuliček a magnetu (Obr. 21). Díky tomuto bodu je zajištěno, že se jednotka homogenně teplotně roztahuje tzn. že měřicí a referenční větve ve skle jsou vždy stejně dlouhé.



Obr. 21 Teplotní kompenzace interferometrické jednotky

## 4.2 Nastavení interferometru pomocí kamer

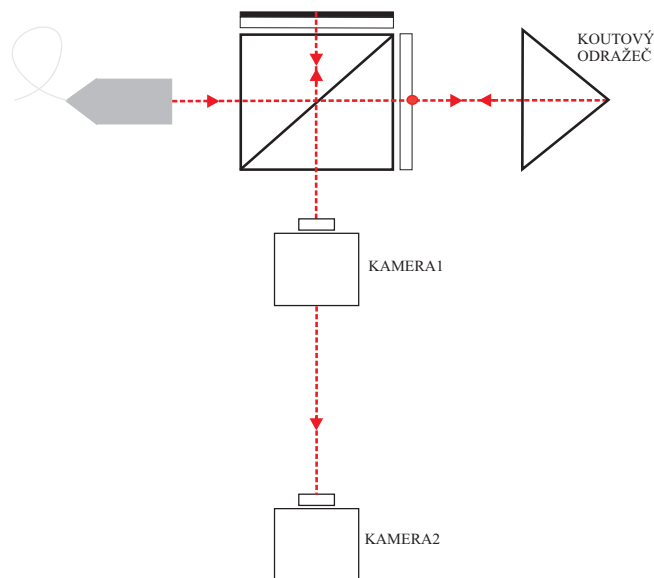
I u této konfigurace je potřeba odstranit geometrické chyby. Po zkušenostech s 4Q detektory jsem raději použila dvě barevné kamery typu MTV – 62W1P s monitory TFT LCD 9,2''. Nejprve jsem se zaměřila na nastavení rovnoběžnosti svazků tedy na tzv. kosinovu chybu. V druhém kroku jsem se zaměřila na nastavení rovnoběžnosti svazků z obou interferometrických jednotek.

### 4.2.1 Nastavení interferometrických jednotek

K nastavování jsem použila dvě kamery s monitory a pomocný koutový odražeč (Obr. 22). Cílem bylo nastavit vstupní svazek z kolimátoru kolmo na čelní a zadní plochu děliče. Kompenzovaná jednotka není vybavena koutovými odražeči a je tudíž velmi citlivá na úhlové chyby zrcadel. Obě kamery snímaly vycházející laserové svazky z interferometrické jednotky. Kameru 1 jsem umístila do vzdálenosti 0,2 m od jednotky a kameru 2 do vzdálenosti 5 m. Na monitoru kamery jsem pozorovala jak sesouhlasení, tak úhlovou rozbíhavost laserových svazků. Koutový odražeč jsem upevnila do úhlově stavitelného držáku a vložila na místo pohyblivého zrcadla. Koutový odražeč zajistil rovnoběžnost svazku odraženého do jednotky a úhlová justáž kolimátoru byla vedena snahou sesouhlasit na výstupu měřicí a referenční svazek.

Nastavování spočívalo ve dvou krocích. V prvním kroku jsem využila kameru 1 a pomocí šroubů na držáku koutového odražeče jsem sesouhlasila laserové svazky, tak že se jejich středy překrývaly. V druhém kroku jsem použila kameru 2 a šrouby na držáku kolimátoru jsem opět sesouhlasila laserové svazky. Tyto dva kroky jsem několikrát

opakovala, až jsem docílila toho, že laserové svazky byly rovnoběžné s chybou nepřesahující několik úhlových vteřin.

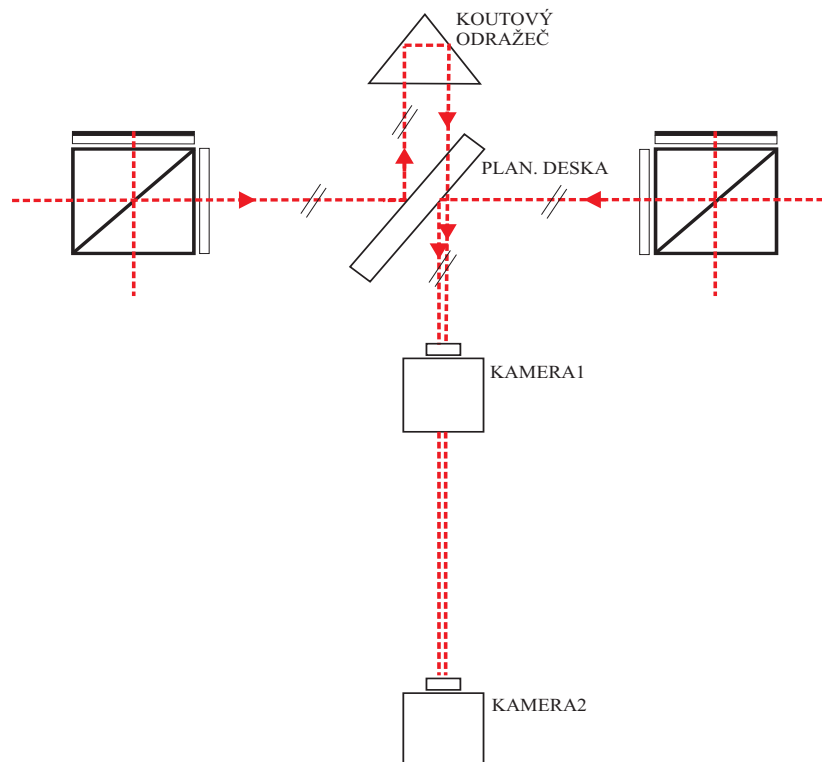


Obr. 22 Schématické znázornění eliminace kosinové chyby

#### 4.2.2 Nastavení rovnoběžnosti svazků pomocí kamer a planparalelní desky

Při tomto nastavování jsem použila opět kamery, koutový odražeč a polopropustnou planparalelní desku. Schématické uspořádání je znázorněno na obr. 23. Toto uspořádání bylo navrženo pro sesouhlasení dvou protiběžných svazků. Cílem nastavování bylo, aby svazky dopadající na planparalelní desku byly rovnoběžné tzn. aby se svazky na monitoru kamery překrývaly. Planparalelní desku jsem umístila na místo pohyblivého zrcadla. Z první interferometrické jednotky laserový svazek dopadá na planparalelní desku a od ní se odráží. Tento odražený svazek jsem pomocí koutového odražeče nasměrovala do kamery. Z druhé interferometrické jednotky se laserový svazek od planparalelní desky odráží přímo do kamery. Kameru 1 jsem umístila do vzdálenosti 0,2 m od planparalelní desky a kameru 2 do vzdálenosti 5 m. Nastavování jsem prováděla ve dvou krocích. V prvním kroku jsem použila kameru v blízkosti planparalelní desky a pomocí šroubů na držáku koutového odražeče jsem nasměrovala laserový svazek tak, aby se na monitoru kamery s druhým svazkem překrýval. V druhém kroku jsem použila vzdálenější kameru a pomocí šroubů na držáku

interferometrických jednotek jsem opět nasměrovala laserový svazek tak, aby se oba svazky na výstupu překrývaly. Tyto dva kroky jsem několikrát opakovala, než jsem docílila rovnoběžnosti svazků, opět s chybou nepřesahující cca 10 úhlových vteřin. Použitý koutový odražeč byl testován na rovnoběžnost odražených vlnoploch interferometrem Ascania a vykázal úhlovou chybu pod 3“, planparalelní deska byla testována autokolimátorem a vykázala úhlovou chybu pod 5“.



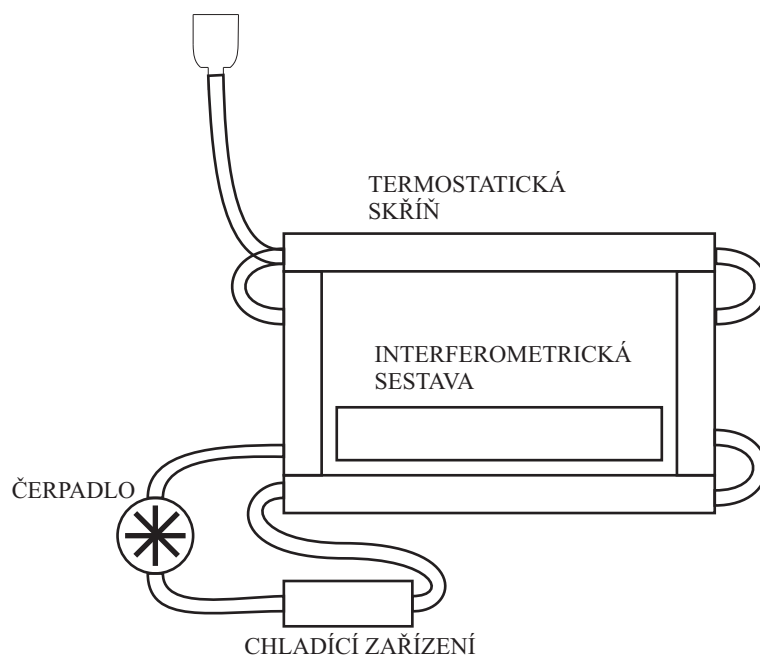
Obr. 23 Schématické znázornění nastavení rovnoběžnosti svazků

### 4.3 Termostatická skříň

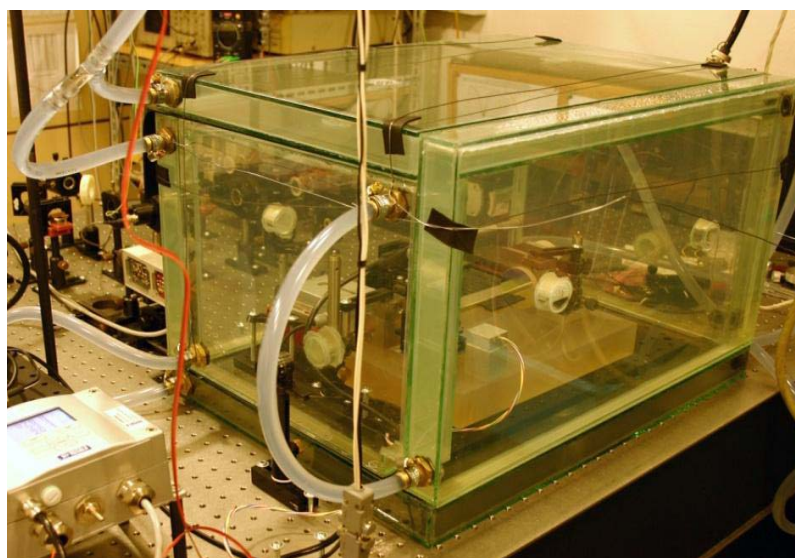
Termostatická skříň (Obr. 24, 25) jsme po konzultaci s vedoucím práce navrhla pro řízení změn indexu lomu vzduchu a pro udržování stabilních podmínek pro měření. Celá měřicí sestava je umístěna uvnitř této termostatické skříně spolu s čidly, které snímají změnu teploty, tlaku, vlhkosti a koncentrace CO<sub>2</sub>.

Termostatická skříň je složena z šesti samostatných skleněných desek, které jsou propojeny hadicemi tak, aby v nich mohla cirkulovat voda. Přední stěna je odnímatelná.

Celkové rozměry termostatická skříně jsou 58 cm x 39 cm x 43 cm a celkový objem desek je 33 l. Součástí termostatická skříně je dále vyrovnávací nádobka, chladicí/topící zařízení a čerpadlo. Vodní okruh s nuceným oběhem vyplňuje všechny stěny skříně účinně potlačuje vznik teplotních gradientů uvnitř termostatizovaného prostoru.



Obr. 24 *Termostatická skříň - schéma*

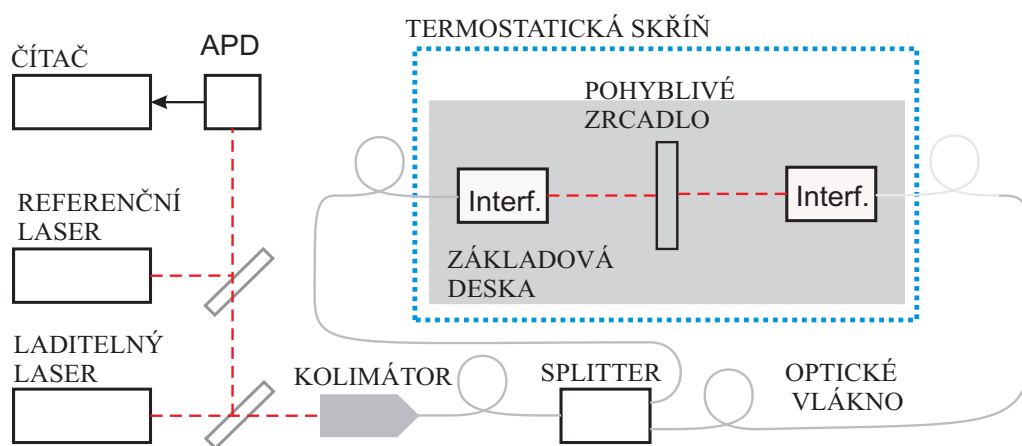


Obr. 25 *Termostatická skříň, převzato [16]*

## 4.4 Uspořádání experimentální sestavy

Sestava, jejíž cílem bylo prokázat schopnost interferometru pracovat v režimu stabilizace vlnové délky byla koncipována v principu podle obr. 13, interferometrické jednotky byly zjednodušené, teplotně kompenzované, viz výše, detekce využívala osvědčeného homodynního principu, přičemž frekvence laseru byla řízena součtem hodnot obou interferometrů. Experiment byl navržen tak, aby bylo možné ukázat drift optické frekvence laseru sledující drift indexu lomu vzduchu. Řízené změny indexu lomu vzduchu jsem dosáhla topením/chlazením prostřednictvím termostatické skříně. Sledování driftu indexu lomu jsem realizovala tradičním způsobem na základě Edlenovy formule a měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a také měřením obsahu CO<sub>2</sub>.

Optickou frekvenci He-Ne laseru jsem měřila porovnáváním s referenčním laserem. V tomto případě tímto laserem byl Helium-Neonový laser stabilizovaný prostřednictvím saturované absorpce v parách jodu, který vykazuje stabilitu optického kmitočtu na úrovni  $10^{-11}$  až  $10^{-12}$ . Principiální schéma celé sestavy je na obr. 26.



Obr. 26 Schéma ladění optické frekvence He-Ne laseru

## 4.5 Výsledky měření

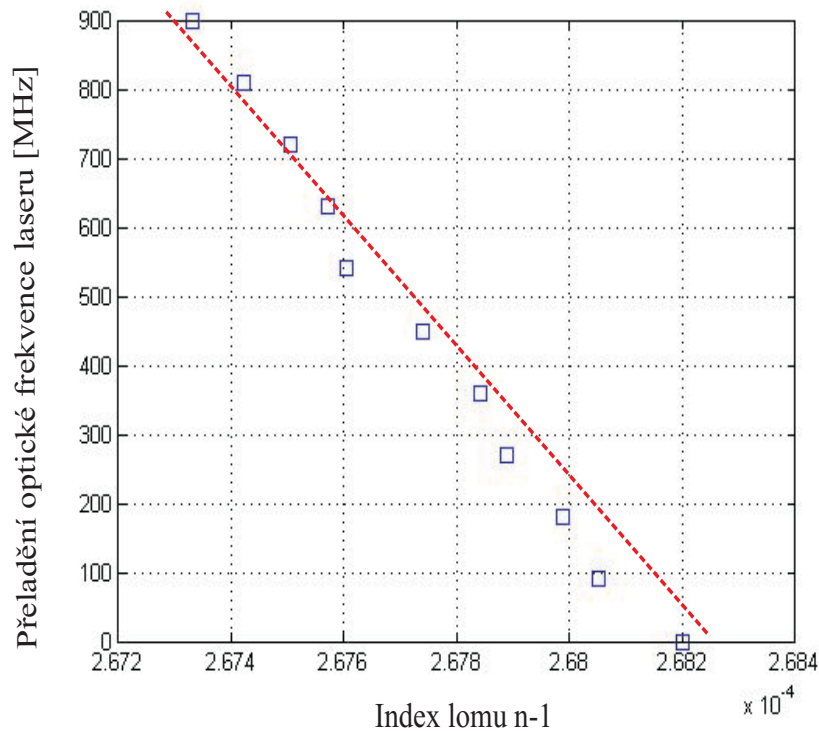
Měření jsem provedla v laboratorních podmínkách a ve statickém režimu se zrcadlem cca v 1/2, dráhy. Ukázalo se, že i přes umístění celého systému na antivibračním



optickém stole s aktivním tlumením se projevují vibrace pohyblivého zrcadla na vozíku posuvu v takové míře, že neumožňují udržení optické frekvence laseru v regulační smyčce. Měřicí rozsah interferometru byl konstantní. Pomocí cirkulace vody a změny její teploty jsem měnila index lomu vzduchu uvnitř termostatická skříně. Pomocí měřicích čidel jsem zaznamenávala změnu parametrů atmosféry. Z těchto změn jsem vypočítala změnu indexu lomu vzduchu. K tomuto výpočtu jsem použila Edlénův vztah. V grafu 1 je znázorněna závislost změny indexu lomu na optické frekvenci laseru během změny teploty ve skříně o cca 1K v režimu stabilizace vlnové délky

### ***Souvislost změn indexu lomu a optické frekvence***

Rozsah relativní změny indexu lomu byl omezen plynulým přeladěním laseru, což odpovídalo ohřevu/chlazení o cca 1K. Celková délka svazku v měřicích trasách (obou interferometrů, v obou směrech) byla 321 mm. Celková relativní změna optické délky při přeladění laseru o 900 MHz byla  $9,2 \times 10^{-7}$ . Pro srovnání jsem použila hodnotu odpovídající změny indexu lomu vzduchu vyjádřenou Edlénovým vztahem z měření teploty, tlaku, vlhkosti a obsahu CO<sub>2</sub>, která je  $8,7 \times 10^{-7}$ . Záznam přeladění optické frekvence laseru a drift indexu lomu jsou uvedeny v grafu 1. Graf je závislostí přeladění na nepřímo měřených hodnot indexu lomu vzduchu (čtverečky) a lineární aproximace (přerušovaná čára). Odchytky naměřených hodnot od lineární závislosti lze přičíst příliš hrubému rozlišení jednotlivých LSB kroků některých čidel. Přes to je zřetelné, že závislost je lineární, že optická frekvence sleduje drift indexu lomu. Technika stabilizace vlnové délky tedy vykazuje souhlas s Edlénovou formulí na úrovni  $5 \times 10^{-8}$ , kde tato odchylka může být nejpravděpodobněji způsobena různou teplotní roztažností některých mechanických komponent soustavy.



Graf 1: Závislost indexu lomu na přeladění laseru

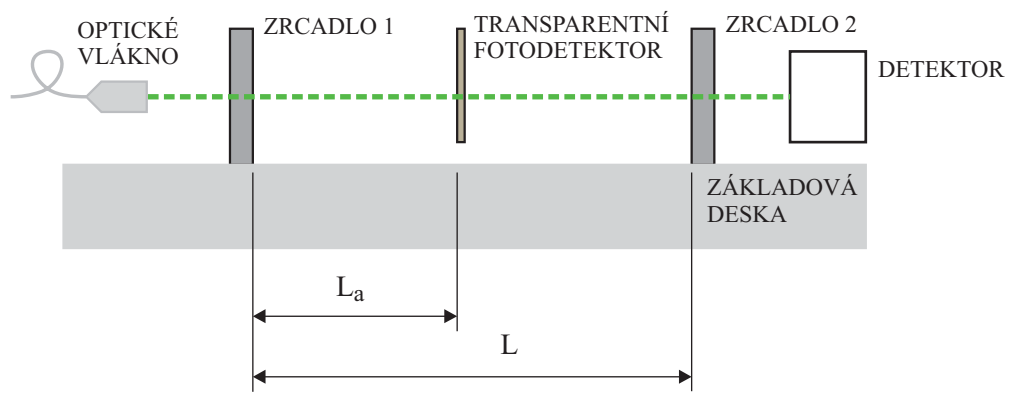
## 5 Koncept se stojatou vlnou v pasivním rezonátoru

Základní koncept stabilizace vlnové délky se jevil jako nejpřímočařeji dosažitelný v pasivním Fabry-Perotově rezonátoru. Regulace laseru mající za cíl udržet v rezonátoru konstantní počet vln (půlvln) je zde snadno realizovatelná stabilizací optické frekvence laseru na jedno z mnoha rezonančních maxim rezonátoru. Použití takového rezonátoru pro měření polohy by bylo možné pouze tehdy, kdyby se podařilo realizovat průhledný fotodetektor s přiměřeně malými ztrátami, aby příliš nepoklesla jakost rezonátoru, který by umožnil detekovat maxima a minima stojaté vlny.

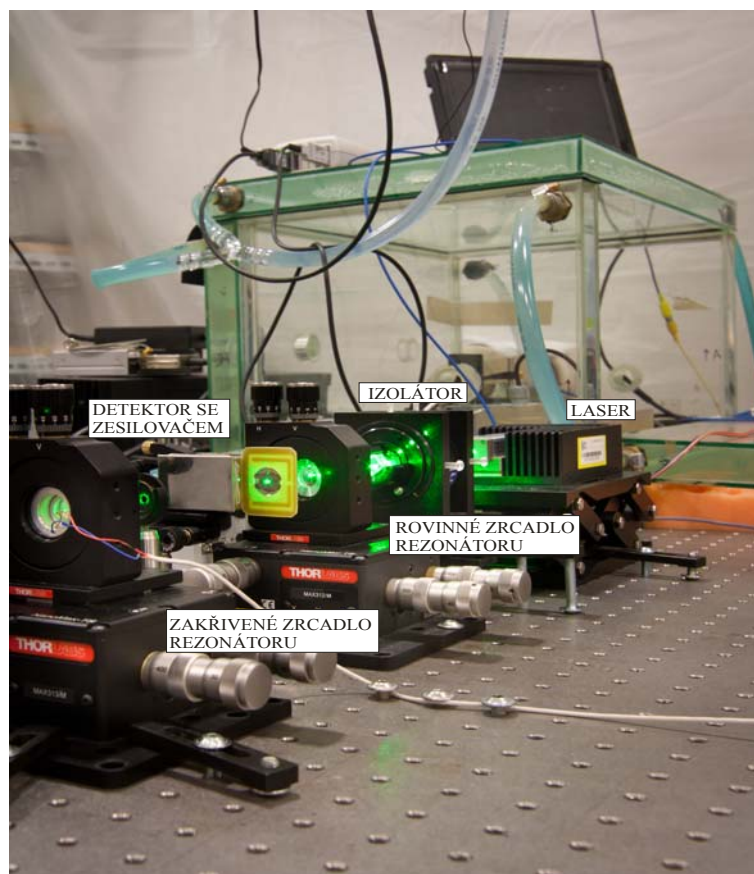
### 5.1 Fabryho-Perotův rezonátor

Pro ověření principu měření polohy ve stojaté vlně průhledným fotodetektorem jsem sestavila Fabryho-Perotův rezonátor. Na obr. 27 je rezonátor schématicky znázorněn. Rozměry a geometrické parametry jsem zvolila na základě koncepce, která se tradičně používá pro (před)stabilizaci laserů Pound-Dreverovou metodou v základní metrologii.

Délka rezonátoru je 0,2 m. Zrcadlo 1 je rovinné, zrcadlo 2 má poloměr křivosti 800 mm. Zaměřila jsem se nyní na použití pevnolátkového Nd:YAG laseru se zdvojnásobením optického kmitočtu pracujícího na vlnové délce  $\lambda = 532$  nm. Nabízí jednak širší přeladění bez modových přeskoků (cca 6 GHz optického kmitočtu) a podstatně vyšší výkon (až 100 mW). Zrcadla jsem umístila do držáků úhlově stavitelných v horizontální a vertikální ose. Zrcadla v těchto držácích jsem ještě umístila na justážní stolky stavitelné ve třech osách. Pomocí těchto všech justážních prvků se mi podařilo naladit rezonátor do základního módu. Na obr. 28 je reálné uspořádání rezonátoru.



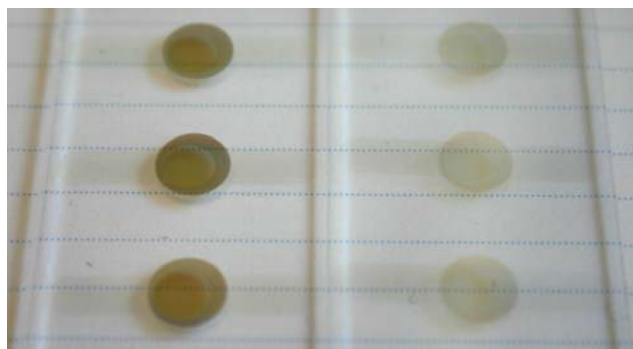
Obr. 27 Rezonátor – schématické uspořádání



Obr. 28 *Rezonátor*

## 5.2 Transparentní fotodetektor

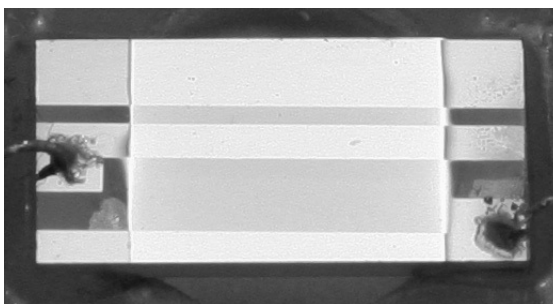
Návrh transparentního, přiměřeně nízkoztrátového fotodetektoru byl klíčovým problémem konceptu měření polohy ve stojaté vlně v pasivním rezonátoru. Připadaly v úvahu dvě řešení, na bázi polovodičového přechodu, tedy fotodiody, nebo fotorezistivní detektor neboli fotoodpor. V tomto případě se jevílo jít cestou fotoodporu technologicky snazší, neboť depozice tenkých vrstev amorfního křemíku metodou vakuového naprašování byla na pracovišti ÚPT k dispozici.



Obr. 29a *Transparentní fotodetektor 1a*

První série pokusů s realizací transparentního fotodetektoru je dokumentována na obr. 29a. Fotodetektor je soustavou tří tenkých vrstev na podložním skle mikroskopu. Horní i spodní vrstva jsou elektrody z materiálu ITO, který je průhledný a elektricky vodivý. Vrstva amorfního křemíku se nachází mezi nimi. Realizovala jsem řadu testů s různými tloušťkami vrstvy křemíku od několika nm až po cca 0,5  $\mu\text{m}$ . Ukázalo se, že klíčový problém představuje homogenita vrstvy a na ploše několika  $\text{mm}^2$  vždy došlo k elektrickému zkratu mezi vrstvami ITO, čímž byl fotoodpor nefunkční.

Koncept s transparentním fotodetektoem bylo ale škoda opustit a proto jsme se s vedoucím diplomové práce obrátili na kolegy na Fyzikálním ústavu v Praze na oddělení tenkých vrstev a nanostruktur (skupina A. Fejfara). Základem nové verze detektoru je křemenné sklo a na něm jsou napařeny dvě titanové elektrody. První detektor (Obr. 29), který jsem dostala na zkoušku, je obdélníkového tvaru o rozměrech 10 mm x 5 mm. Jelikož je detektor malých rozměrů, vyrobila jsem na něj držák z kuprexitu s kruhovým otvorem uprostřed a detektor jsem na tento držák přilepila. Nakontaktování detektoru provedli na VUT na Ústavu mikroelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií. Hlavní rozdíl vůči předchozím neúspěšným pokusům spočívá v uspořádání elektrod po stranách aktivní plochy, čímž je zkrat vyloučen.



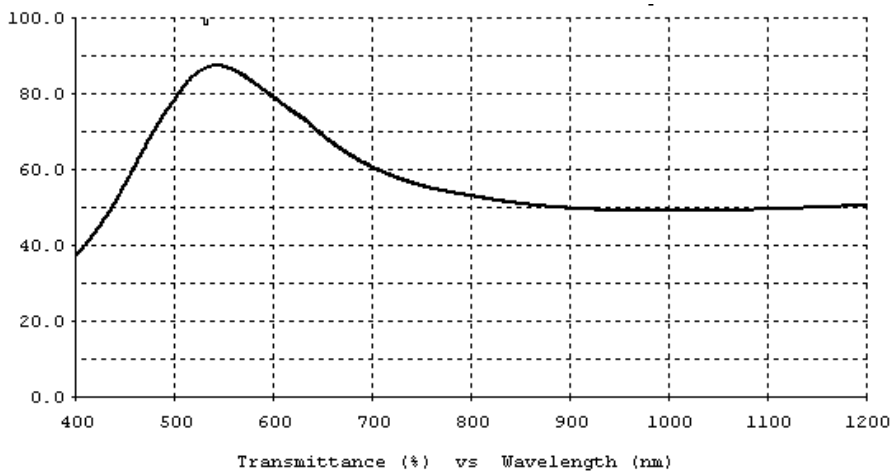
Obr. 29 *Transparentní fotodetektor 1*

S tímto fotodetektozem jsem udělala sérii pokusů s detekcí stojaté vlny. Svoji tloušťkou křemíkové vrstvy cca 50 nm a absencí antireflexních vrstev vykazoval značný útlum, čímž jeho použití v rezonátoru nebylo možné. Vytvořila jsem tedy stojatou vlnu pouze odrazem kolimovaného laserového svazku od rovinného zrcadla a detektor polohovala jednoosým nanostolkem HERA od firmy. Physik Instrumente. Detekce interferenčních minim a maxim se zdařila, kontrast byl ovšem na úrovni pouhých cca 5% celkové úrovně signálu. To bylo motivem k dalšímu pokusu.

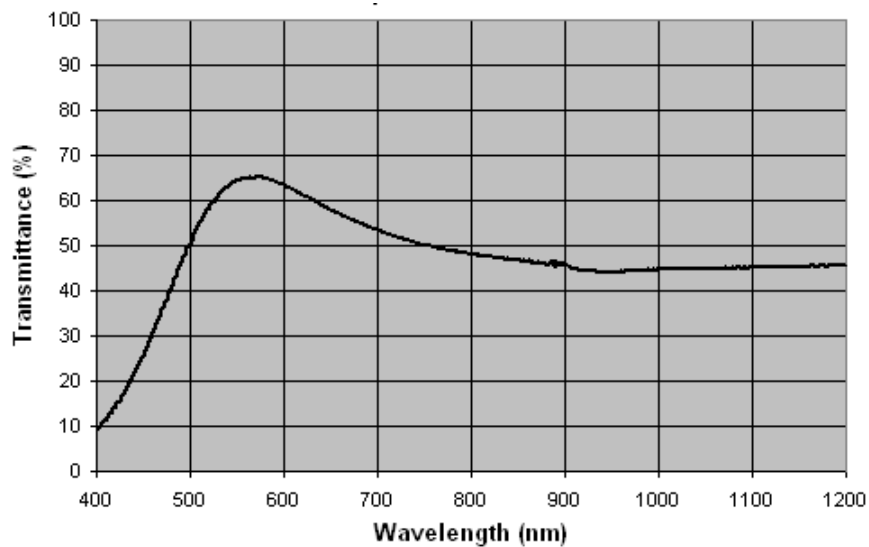
Druhý detektor (Obr. 30), který jsme s vedoucím práce dostali k dispozici z FZÚ, byl již navržen podle našich představ. Je kruhový o průměru 20 mm, základní deska je z křemenného skla s povrchem optické kvality (rovinnost  $\lambda/20$ ) a na ní jsou napařeny dvě titanové elektrody. Abych snížila odrazivost povrchu detektoru, nechala jsem nanést na obě strany vhodnou tloušťku antireflexní vrstvy. Jednotlivé vrstvy a jejich tloušťky jsou uvedeny v tabulce 1. Aktivní strana fotodetektoru s křemíkovou vrstvou představuje sama o sobě optimalizovaný systém interferenčních vrstev minimalizující odraznost. Návrh soustavy vrstev a jejich realizaci provedli RNDr. Pavel Pokorný a Mgr. Jindřich Oulehla na ÚPT, nanesení těchto vrstev proběhlo vakuovým napařováním elektronovým svazkem na aparatuře Balzers BAK 550. Depozice antireflexní vrstvy z přední strany proběhla při teplotě cca 50 °C a depozice ze zadní strany při teplotě cca 280 °C. Vrstvy jsem nechala optimalizovat na vlnovou délku 532 nm. Spektrální závislost propustnosti detektoru podle modelu je na obr. 30a, skutečná, naměřená propustnost je pak na obr. 30b.

Detektor jsem pro lepší manipulaci přilepila na držák z kuprextitu. Nakontaktování opět provedli na VUT. Použili vodivé lepidlo EPO-TEK H31D. Tvrzení probíhalo jednu

hodinu při teplotě  $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V těsné blízkosti fotodetektoru byl umístěn předzesilovač ve stíněné plechové krabici.



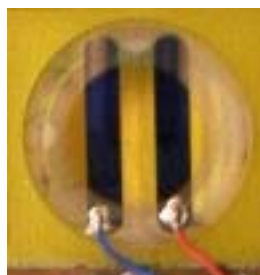
Obr. 30a *Spektrum propustnosti transparentního fotodetektoru optimalizovaného pro vlnovou délku 532 nm, podle modelu*



Obr. 30b *Záznam spektra propustnosti transparentního fotodetektoru*

Tab. 1: *Typ materiálu a jeho tloušťka*

Typ materiálu	Tloušťka vrstvy [nm]
<b>Přední strana</b>	
TiO <sub>2</sub>	50
Si	28
TiO <sub>2</sub>	46
<b>Zadní strana</b>	
TiO <sub>2</sub>	28
SiO <sub>2</sub>	61
TiO <sub>2</sub>	14
SiO <sub>2</sub>	195



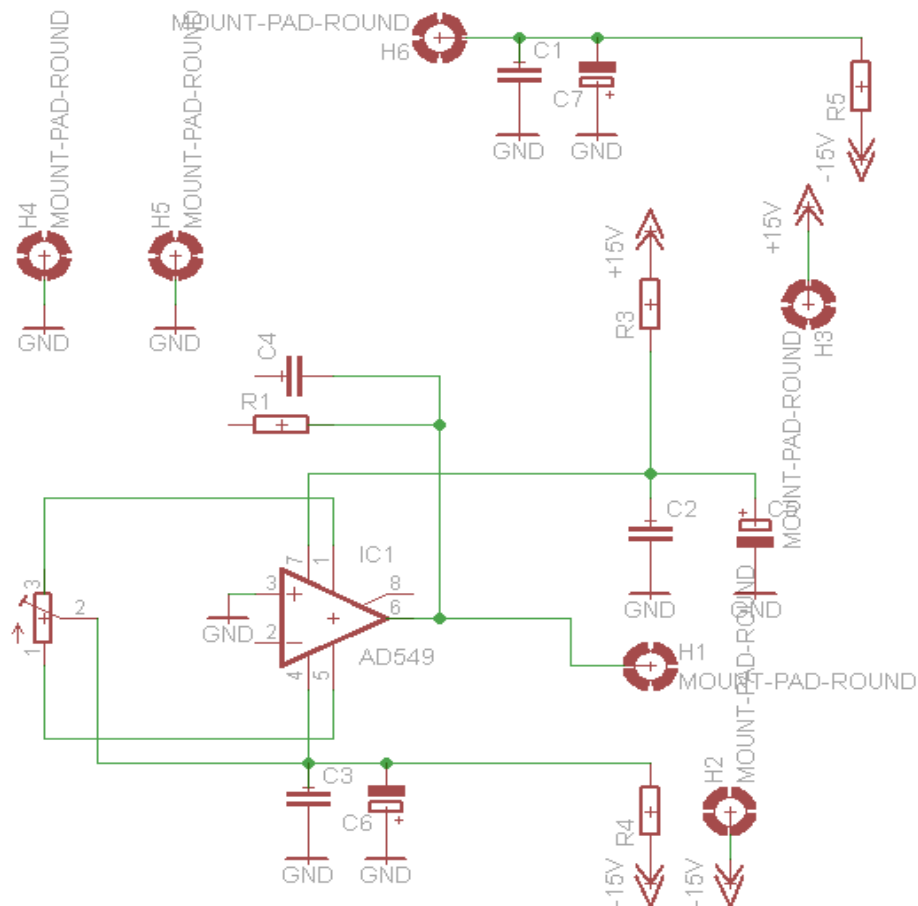
Obr. 30 *Transparentní fotodetektor 2*

### 5.3 Předzesilovače pro transparentní fotodetektory

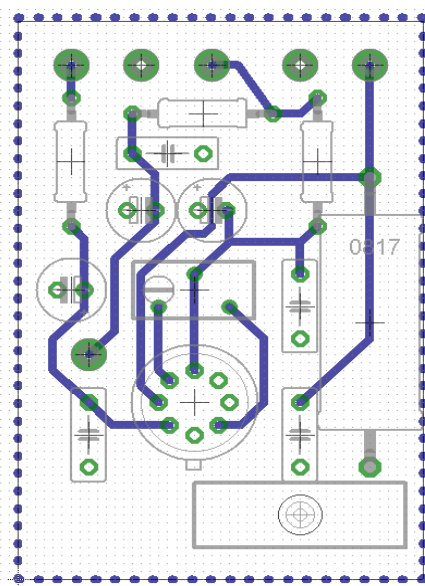
První verze transparentního fotodetektoru z FZÚ vykazovala velmi velkou hodnotu elektrického odporu: 5 GΩ. Bylo tedy nutné navrhnout vhodný předzesilovač s velmi vysokým vstupním odporem, protože laboratorními měřicími přístroji, které byly k dispozici, nebyl signál tohoto prvku detekovatelný. Zesilovač byl navržen jako převodník proud/napětí s operačním zesilovačem, kde vlastní fotoodpor je zapojen se stejnosměrným předpětím. Volba vhodných operačních zesilovačů tomu odpovídala, typ AD 549, AD795 (jednoduchý) a AD648 (dvojitý) jsou typy vhodné pro aplikace s extrémně vysokou vstupní impedancí, jako jsou detektory signálů EEG, pH-metry, ap.



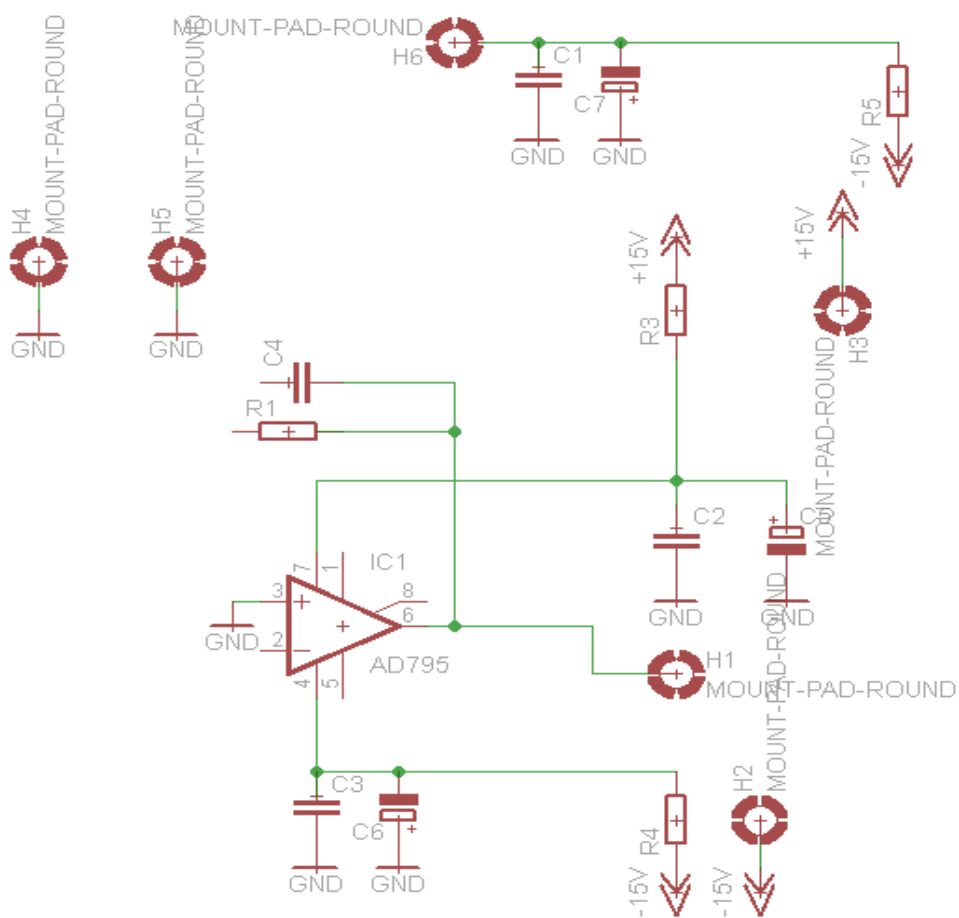
Schématu zesilovačů (Obr. 31, 33, 35) a návrhy plošných spojů (Obr. 32, 34, 36) jsem vytvořila v programu Eagle. Celkem jsem udělala tři návrhy zesilovačů a k tomu návrhy desek plošných spojů, které jsem nechala vyrobit ve firmě Gatema. Ve schématech nejsou propojeny vývody zpětnovazebního vysokohmového ( $1\text{G}\Omega$ ) odporu a invertujícího vstupu operačního zesilovače, protože jsou vedeny vzduchem. Svodový odpor plošného spoje je příliš malý. Verze s dvojitým zesilovačem byla navržena s předpokladem budoucí konstrukce transparentního fotodetektoru se dvěma aktivními vrstvami pro kvadraturní detekci.



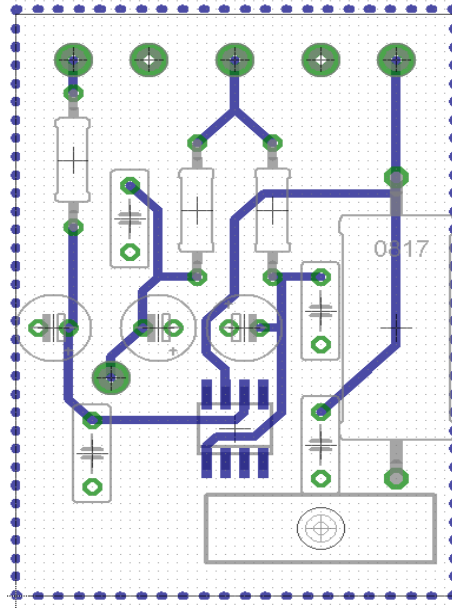
Obr. 31 Schéma zesilovače 1



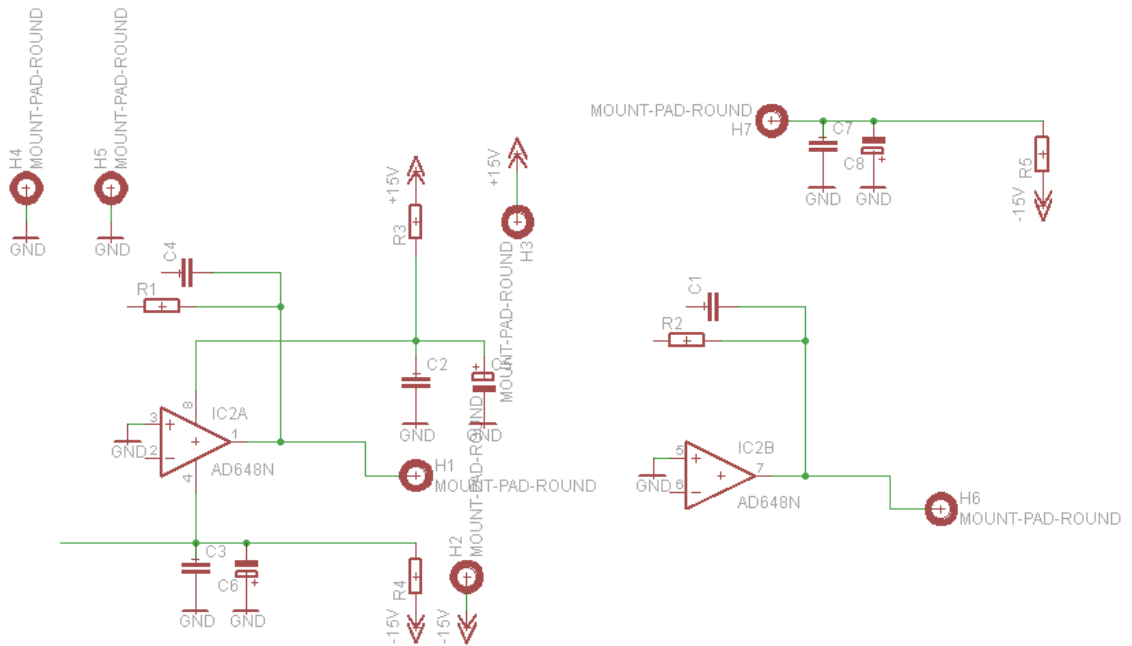
Obr. 32 Deska plošných spojů pro zesilovači 1



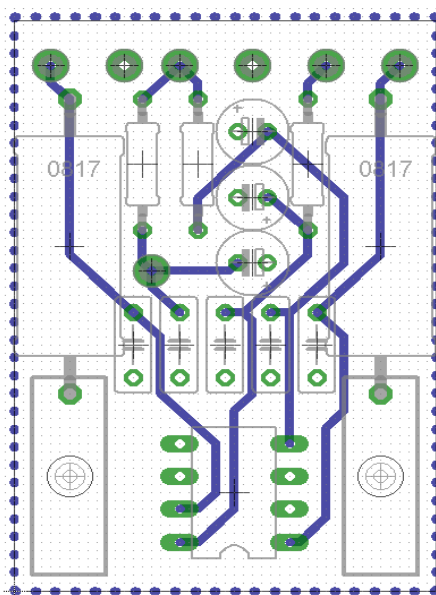
Obr. 33 Schéma zesilovače 2



Obr. 34 Deska plošných spojů pro zesilovač 2



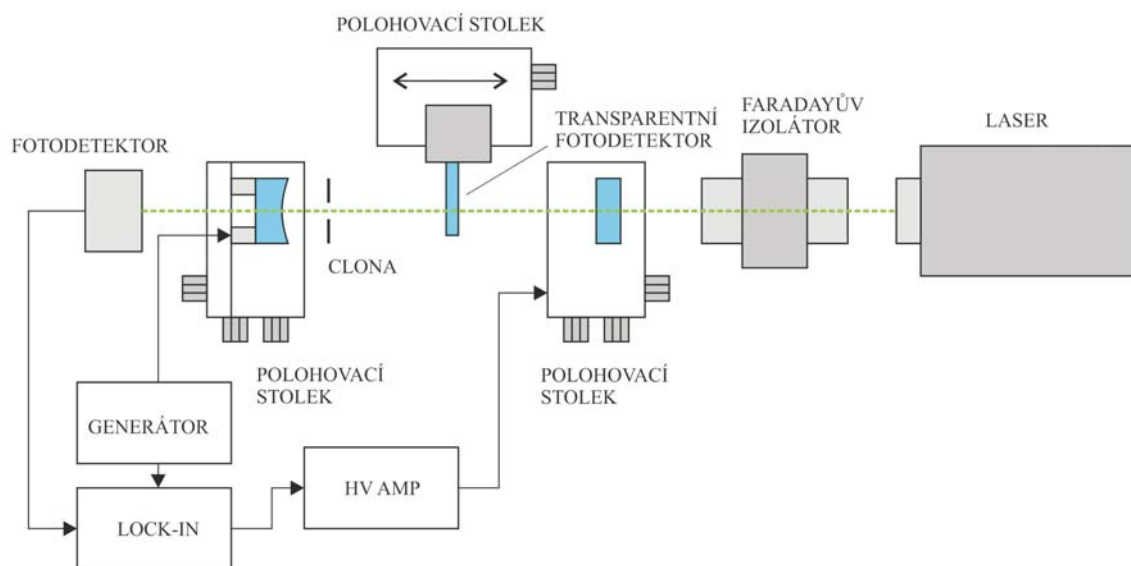
Obr. 35 Schéma dvojitého zesilovače



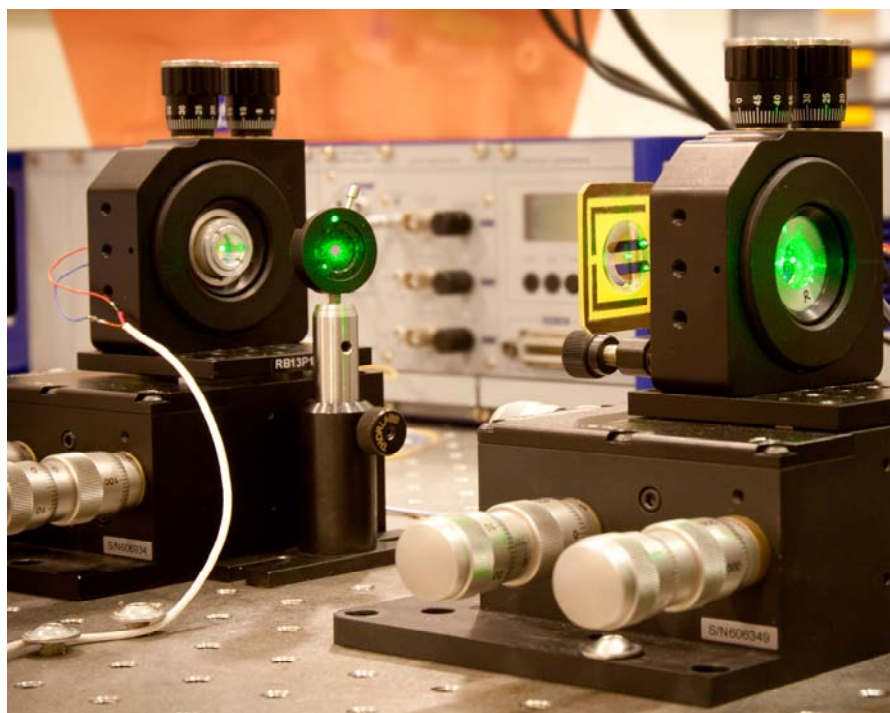
Obr. 36 Deska plošných spojů pro dvojité zesilovač

#### 5.4 Experimentální sestava rezonátoru s transparentním fotodetektorem

Při zkoušce rezonátoru spolu s transparentní fotodetektorem jsem musela zapojit regulační smyčku, která zajistila naladění laseru na rezonanci rezonátoru. Princip řízení délky rezonátoru je založen na modulaci délky a synchronní detekci, čímž se rozliší směr případného rozladění vůči centrálnímu maximu. Regulační smyčka zahrnuje kartu generátoru, lock in kartu, HV AMP (vysokonapěťový zesilovač a PI regulátor) kartu, dva osciloskopy zobrazující stav regulátoru a výstup z transparentního fotodetektoru a fotodetektor se zesilovačem HUV-1100 BG (EG&G). Zapojení regulační smyčky je na obr. 37. Signál z detektoru jsem přivedla na osciloskop a na lock-in kartu (synchronní demodulátor), ze stejnosměrného výstupu lock-in karty jsem signál přivedla na HV AMP kartu. Z lock-in karty (REF) jde signál na kartu generátoru (REF) a z generátoru (SINE) jde signál na HV AMP kartu (REG). Modulace délky rezonátoru byla na kmitočtu cca 1 kHz prostřednictvím piezoelementu, který je součástí držáku jednoho ze zrcadel. Vlastní řízení délky rezonátoru jsem realizovala jedním ze dvou polohovacích stolků, který byl vybaven PZT členem. Toto řízení bylo pomalejší, ale ve větším rozsahu. Hloubka modulace byla volena přiměřeně malá, aby se pohybovala jen v malém rozmezí okolí rezonančního maxima.



Obr. 37 Schéma řízení délky rezonátoru



Obr. 38 Fotodetektor v pasivním rezonátoru

Nastavení pasivního rezonátoru tak, aby byl vybuzen základní mód  $TEM_{00}$  se po jistém úsilí zdařilo, zvláště díky možnosti jemné justáže obou zrcadel ve všech stupních volnosti (Obr. 38). V takovéto mechanické sestavě se o velké stabilitě nedalo sice příliš hovořit, ale pro ověření principu detekce interferenčních maxim byla postačující.

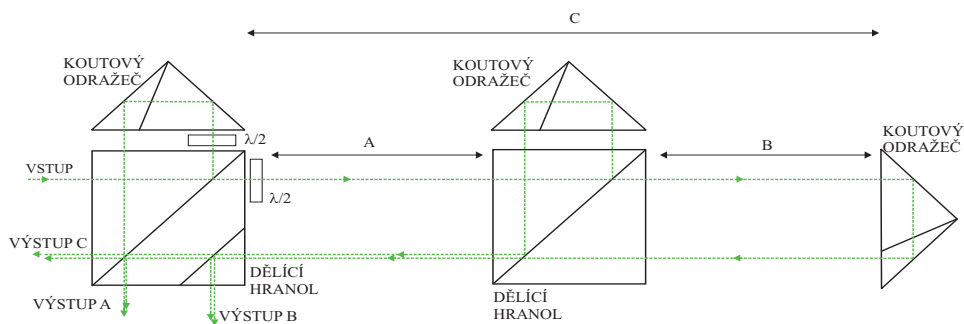
Výsledný signál reprezentující střídající se interferenční maxima a minima při posuvu transparentního detektoru byl ale zklamáním, pohyboval se na úrovni jen o málo vyšší, než byla hladina šumu. Pravděpodobné vysvětlení spočívá v technologii výroby transparentního fotodetektoru, kde verze s AR vrstvami vykazuje až o 3 řády nižší odpor ve srovnání s prvním vzorkem bez vrstev a je pravděpodobné, že difúze materiálů vrstev do křemíku příliš zhoršila jeho fotorezistivní vlastnosti. Vývoj dalších verzí fotodetektoru ve spolupráci s FZÚ probíhá, z časových důvodů už ale není zahrnut do této práce.

## 6 Trojitý interferometr

Nové uspořádání interferometru bylo vyvíjeno současně s konceptem transparentního fotodetektoru. Oproti předešlým dvěma typům má výhodu v tom, že se zde nemusím zabývat eliminací úhlových chyb, protože jsem místo odrazného zrcadla použila koutový odražeč. Koutový odražeč je optický hranol, který má tu vlastnost, že dopadající a odražené svazky jsou vždy vůči sobě rovnoběžné bez ohledu na úhel dopadu (s přesností omezenou přesností vzájemné kolmosti ploch hranolu).

Na obr. 39 je znázorněno principiální schéma tohoto interferometru, který se skládá ze dvou interferometrických jednotek a koutového odražeče.

Další odlišností je uspořádání celého interferometru. První interferometrickou jednotku a koutový odražeč jsem pevně upevnila k základové desce, mezi nimi se nachází druhá interferometrická jednotka, kterou jsem upevnila do držáku a umístila na motorický posuv. Tento posuv zajišťuje změnu dílčích vzdáleností. Celková vzdálenost interferometru mezi první jednotkou a koncovým koutovým odražečem je vždy stejná a je mechanicky vázaná na základovou desku ze Zeroduru. Vzdálenost mezi první interferometrickou jednotkou a koutovým odražečem je 210 mm. Motorický posuv jsem použila LIMES 80 od firmy OWIS, který má celkový posuv 210 mm. Posuv zde představuje měnící se měřenou vzdálenost, jejíž rozsah je vymezen celkovou délkou ke koncovému odražeči. Druhá interferometrická jednotka nahrazuje pohyblivé rovinné zrcadlo použité v předchozích sestavách. Uspořádání je unikátní třemi nezávislými výstupy. Výstupy A a B jsou ekvivalentní dílčím vzdálenostem protiběžných interferometrů z obr. 13, výstup C pak nezávisle měřenou celkovou délkou.



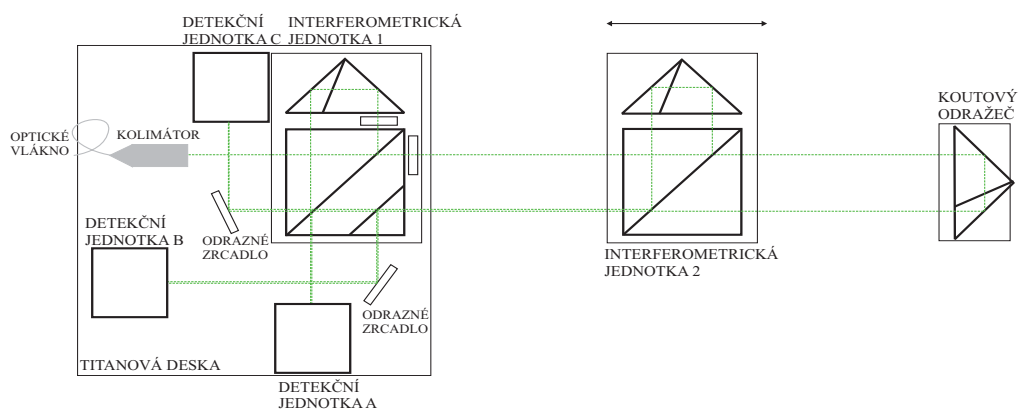
Obr. 39 Principiální schéma interferometru se třemi výstupy

## 6.1 Interferometrická jednotka

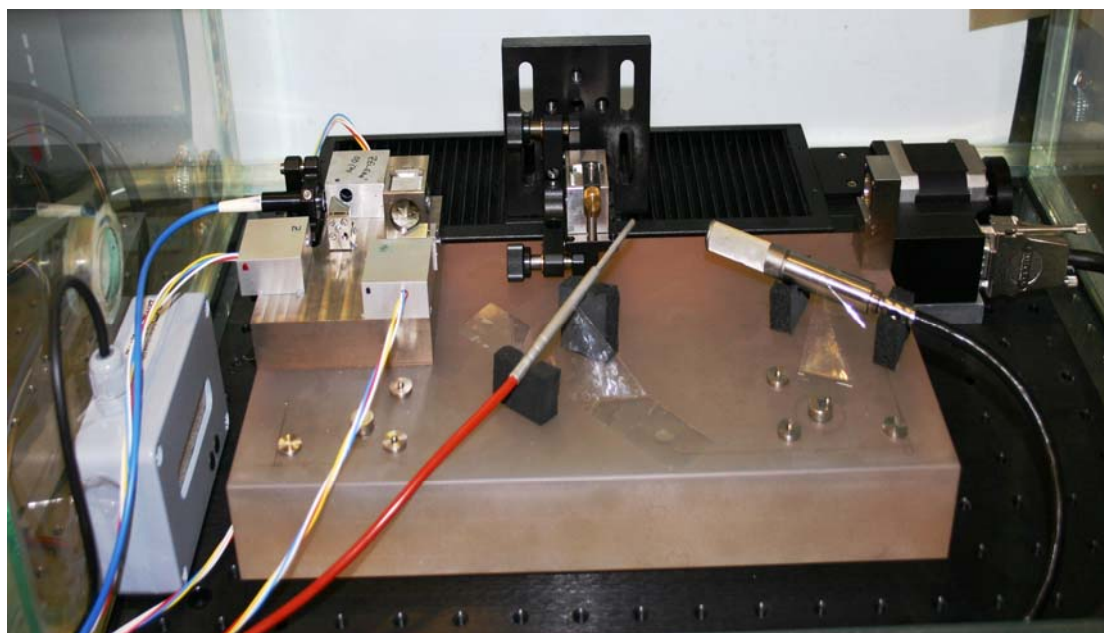
Obě interferometrické jednotky se skládají z dělicího hranolu a koutového odražeče. Dělicí hranoly jsou vyrobeny z optického skla SF 14 a mají rozměry 15 mm x 15 mm x 15 mm. Hranoly jsme s vedoucím diplomové práce nechali vyrobit v Meoptě Přerov. Na výrobu byly kladeny velké nároky na přesnost. Požadovaná přesnost rovnoběžnosti stěn u hranolu byla pět úhlových vteřin. Koutové odražeče jsou vyrobeny z optického skla BK 7 o průměru a výšce 15 mm. Celá interferometrická jednotka je v titanovém pouzdře. Součástí první jednotky jsou ještě půlvlnné desky ( $\lambda/2$ ), které stáčí rovinu polarizace o  $45^\circ$ .

Na obr. 40 je znázorněna celá interferometrická sestava spolu s kolimátorem, dvěma odraznými zrcadly a třemi detekčními jednotkami. Základová deska je opět ze Zeroduru o stejných rozměrech jako v předešlé interferometrické sestavě. Na ní jsem přilepila titanovou desku o rozměrech 80 mm x 20 mm x 80 mm. Na této desce se nachází první interferometrická jednotka, držák s kolimátorem, dvě odrazná zrcadla a tři detekční jednotky. Všechny tyto komponenty jsem na titanovou desku přilepila epoxidovým tmelem „LOCTITE 3450“. Body ve kterých je interferometrická jednotka přilepena k titanové desce jsem volila s ohledem na teplotní roztažnost materiálu. Podobně, jako u jednotky na obr. 18 je zde referenční bod přední plocha dělicího hranolu, z něhož vystupuje měřicí svazek a body přilepení jsou kolmým průmětem roviny této plochy na Zerodurovou desku. U druhé jednotky se vlivu její teplotní roztažnosti nelze vyhnout, z důvodů technologické náročnosti nebyla její výroba z materiálu s ultranízkou dilatací reálná. Koutový odražeč, který se nachází na druhém okraji základové desky je také v titanovém pouzdře a opět je přilepen epoxidovým tmelem k titanové podložce, která

má rozměry 15 mm x 20 mm x 20 mm. Obdobně je jeho přední skleněná plocha referenční. Jako zdroj laserového záření jsem použila pevnolátkový Nd:YAG laser o vlnové délce 532 nm s možností ladění a modulace optického kmitočtu PZT členem (laser Prometheus od firmy Innolight, Německo). Celá sestava je umístěna opět v termostatické skříní (Obr. 41).



Obr. 40 Interferometrická sestava s třemi výstupy



Obr. 41 Třetí sestava interferometru



## 6.2 Výsledky měření

Měření probíhalo v laboratorních podmínkách. Měřicí sestavu jsem umístila do termostatické skříně spolu s čidly na měření parametrů atmosféry – teploty, tlaku, vlhkosti a obsahu CO<sub>2</sub>. Celkem jsem provedla šest záznamů, ve kterých jsem ověřila funkci interferometru a koncept kompenzace vlivu změn indexu lomu vzduchu.

Změny teploty jsme měřila pomocí teploměru F 100, který měří s rozlišením 1 mK a je kalibrován na ČMI s absolutní přesností na 10 mK. Pro toto měření je důležité především rozlišení, neboť sleduji změny indexu lomu. Od firmy VAISALA jsem použila měřicí zařízení PTU 303, které měří také teplotu, navíc tlak a vlhkost. Poslední zařízení, které jsem použila byl měřič koncentrace CO<sub>2</sub> ALMENO 2490 o firmy AHLBORN. Ke sledování průběhu měření a záznamu dat z interferometrů a čidel jsem použila program vytvořený v grafickém programovacím jazyce „LabVIEW“.

### 6.2.1 Záznam interferometru při otevřené termostatické skříně

První měření probíhalo s otevřenou termostatickou skříní a s vypnutým motorem elektrického posunu. Zaznamenávala jsem údaje z interferometru A, B, C a index lomu vzduchu. Cílem bylo prokázat, jaké jsou fluktuace indexu lomu změřené interferometry ve statickém režimu při otevřené skříně a porovnat se záznamem indexu lomu určeného Edlénovou formulí z hodnot čidel. Na konci měření jsem do sestavy foukla, čímž jsem do systému vnesla prudkou změnu indexu lomu vzduchu.

V grafu 2 jsou znázorněny průběhy z interferometrů A, B a C. Na ose x je krok vzorkování, který odpovídá vzorkovací frekvenci 100 vzorků za sekundu. Rychlejší vzorkování se neukázalo nutné vzhledem k pomalosti dějů souvisejících s prouděním vzduchu v interferometru. V tomto případě měření probíhalo patnáct minut. Na ose y je znázorněna amplituda v LSB krocích převodníku, tedy

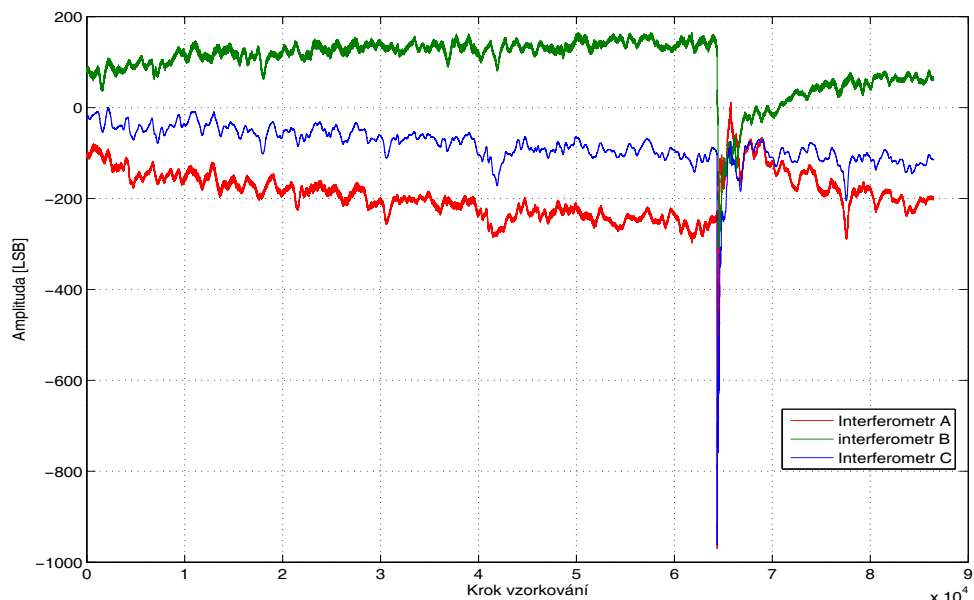
$$1 \text{ LSB} = (\lambda/2)/1024 = (532,24350/2)/1024 = 0,259884521 \text{ nm} \sim 0,260 \text{ nm} = 260 \text{ pm}.$$

Přesnou hodnotu vlnové délky laserového zdroje jsem změřila pomocí vlnoměru. Ze záznamu je patrné, že se pohybujeme na úrovni jednotek nanometrů. Ostrý „pík“ v desáté minutě měření představuje fouknutí do měřicí sestavy. Fouknutí jsem směřovala více do měřicí větve interferometru A, proto je pík u interferometru B menší.

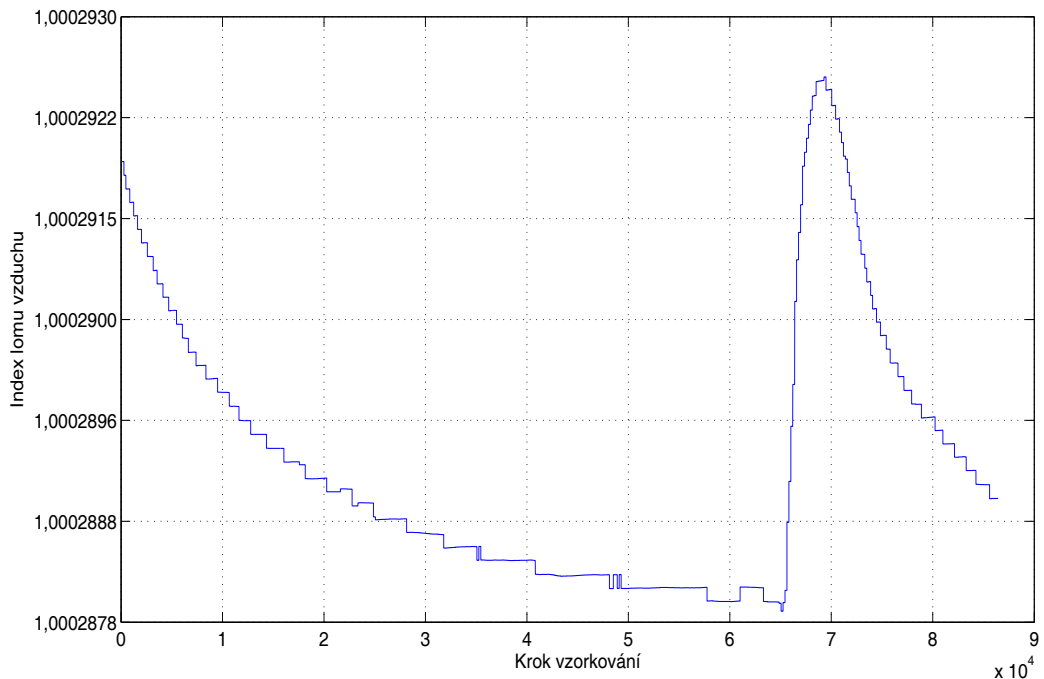
Mezi signály je patrná vzájemná korelace. Interferometry A a B jsou zatíženy větším šumem oproti interferometru C. Tento větší šum je způsoben mechanickou nestabilitou držáku na kterém je upevněna druhá interferometrická jednotky.

V grafu 3 je znázorněna změna indexu lomu vzduchu, která je vypočítaná z Edlénovy rovnice. Na ose x je opět krok vzorkování a na ose y jsou hodnoty indexu lomu vzduchu. Hodnoty změny indexu lomu vzduchu jsou v grafu vyčísleny na sedm desetinných míst, rozlišení čidel umožňuje vyčíslení na devět desetinných míst. Ostrý pík znázorňuje změnu podmínek měření, tedy fouknutí do měřicí sestavy.

Ze záznamů vyplývá, jak citlivě reagují interferometry na změny indexu lomu a jak velké tyto změny jsou, není-li sestava důsledně uzavřena ve skříni. V laboratoři během měření nebyl žádný pohyb osob, ani ničeho jiného (s výjimkou fouknutí), neběžela klimatizace, ani přisávání vzduchu. Všechny rychlé změny indexu lomu viditelné na grafu 2 nejsou nepřímou metodou Edlénovy formule postižitelné (Graf 3). Zajímavá je též zřetelná korelace mezi interferometry A a B, přestože dráha jejich svazků není totožná. Oba pak jasně korelují s interferometrem C, takže pokud by byl využit jako „sledovací“ (tracking) refraktometr, bude jeho výstup velmi dobře použitelný pro kompenzaci údajů o délce měřené interferometry A i B.



Graf 2: Záznam interferometrů – otevřená termostatická skříň



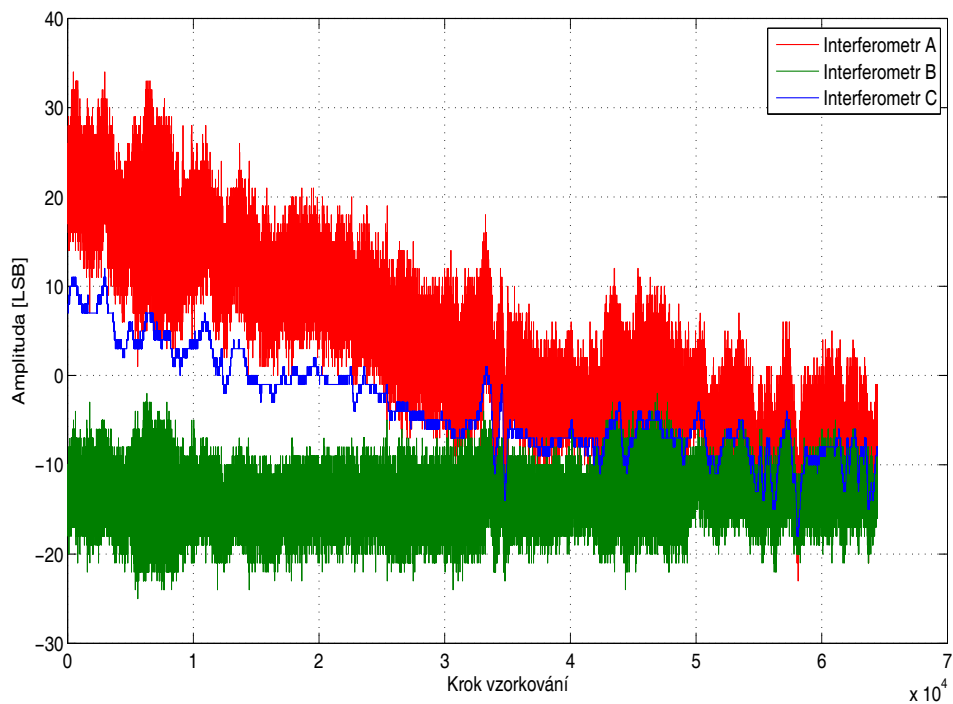
Graf 3: Změna indexu lomu vzduchu – otevřená termostatická skříň

## 6.2.2 Záznam interferometru při zavřené termostatické skříni

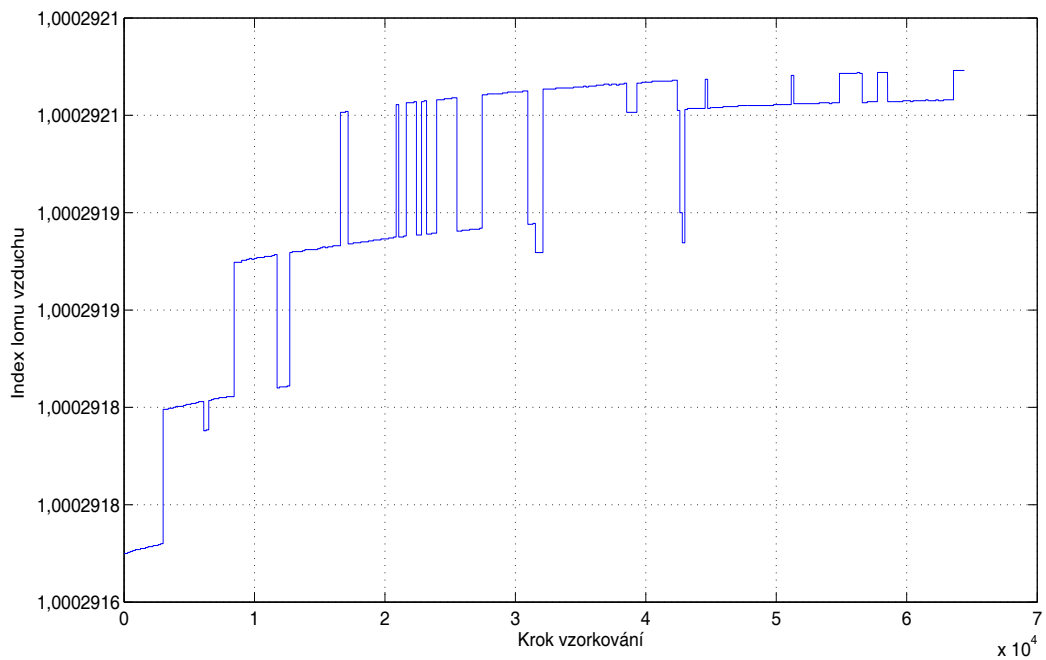
Při druhém měření jsem uzavřela termostatickou skříň, motorický posuv byl vypnutý a zaznamenávala jsem údaje z interferometrů A, B, C a index lomu vzduchu.

V grafu 4 je znázorněn průběh z jednotlivých interferometrů. Na ose x je krok vzorkování v tomto případě měření probíhalo do dobu dvanácti minut. Na ose y je vynesena amplituda v LSB krocích. Signály z interferometru A a B jsou zašuměné více než signál z interferometru C což je opět způsobeno mechanickou nestabilitou držáku s druhou interferometrickou jednotkou. Šum z interferometru A a B se pohybuje na úrovni 10 – 15 LSB, což odpovídá jednotkám nanometrů. Šum z interferometru C je na úrovni 1 LSB.

V grafu 5 je průběh změny indexu lomu vzduchu. Index lomu má vzrůstající tendenci, protože dochází ke stabilizaci měřících podmínek v termostatické skříni. Na ose x je krok vzorkování a na ose y změna indexu lomu vzduchu.



Graf 4: Záznam interferometrů – zavřená termostatická skříň



Graf 5: Změna indexu lomu vzduchu – zavřená termostatická skříň

Ze záznamu je zřetelný veliký rozdíl jak ve velikosti driftu indexu lomu vzduchu v uzavřené skříni ve srovnání s otevřenou, tak i výrazné „zklidnění“ malých rychlejších změn indexu lomu. Pozitivním zjištěním je nízký šum a stabilita součtového interferometru C, který je tak vhodný i jako reference pro stabilizaci vlnové délky laseru. Poučný je též záznam indexu lomu, na němž je vidět jak pomalý drift související s pomalou změnou teploty (čidlo teploty má jemné rozlišení), tak i různě velké skoky způsobené různě hrubým rozlišením ostatních čidel.

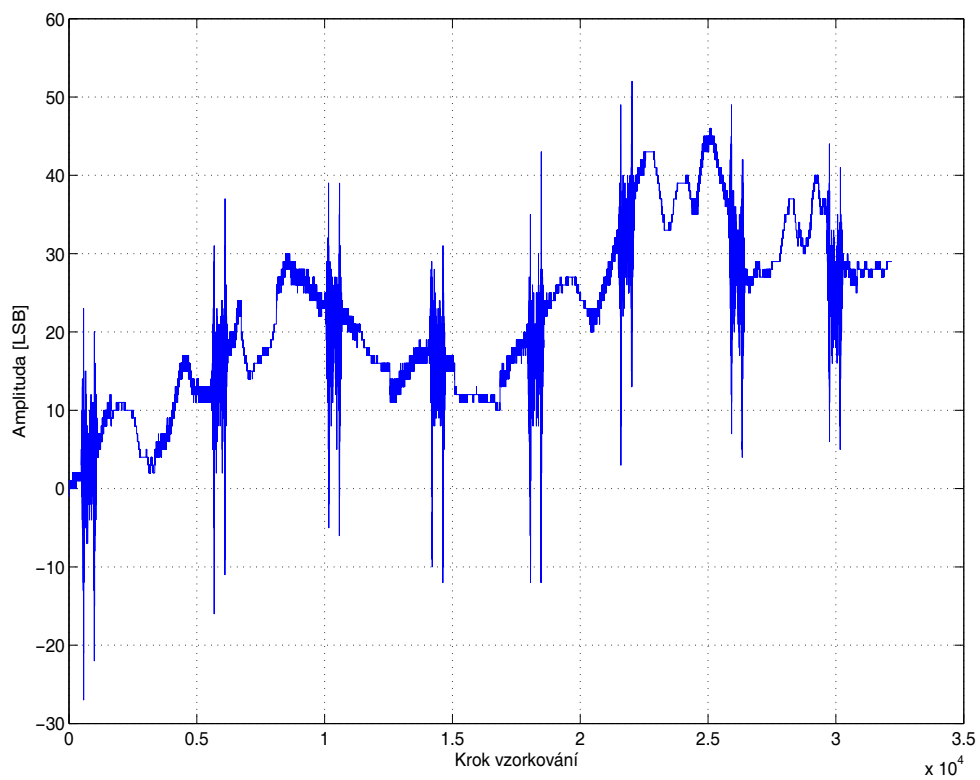
### 6.2.3 Záznam interferometru při pojezdu

Třetí měření jsem prováděla při zavřené termostatické skříni a zapnutém pojezdu. Jelikož vozík vykazuje nevelkou mechanickou stabilitu, tak měření probíhalo po krocích. Klíčovým problémem tohoto posuvu se ukázalo být použití krokového motoru, který je velkým zdrojem vibrací. Stejnosměrný motor by byl lepší, ale nebyl v dané chvíli k dispozici. V prvním kroku jsem zapnula software ovládající pojezd a popojela s vozíkem o 1 cm poté jsem software opět vypnula, protože zapnutí ovládacího softwaru způsobí připojení napájení k motoru a ten pod napájením vykazuje vibrace, i když se nehýbe. Tento postup jsem opakovala osmkrát za sebou. Po celou dobu jsem měla zapnutý zápis dat.

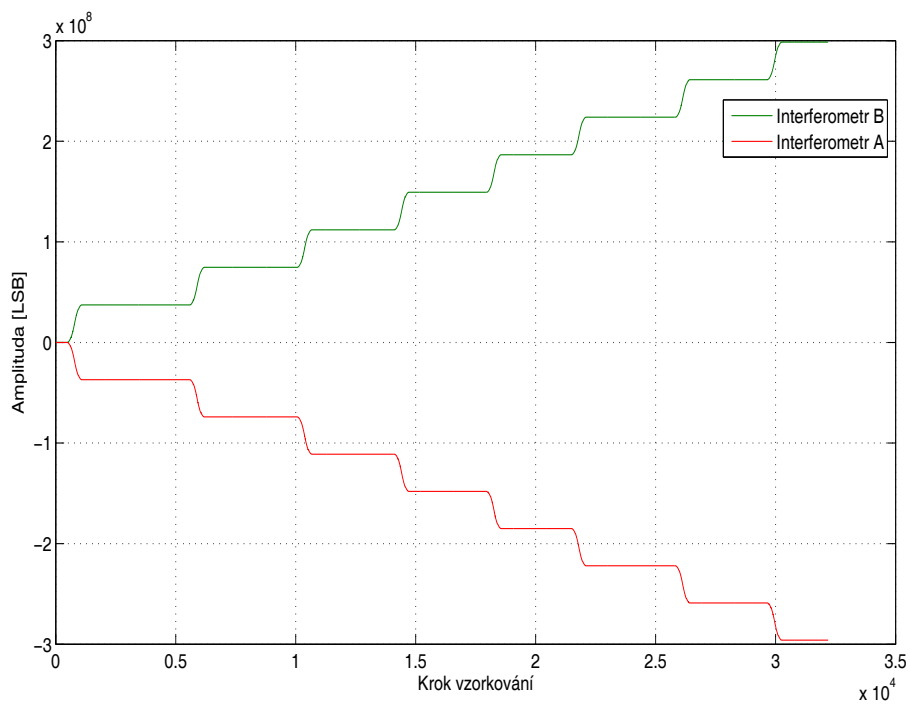
V grafu 6 jsou znázorněna data z interferometru C, ostré píky znamenají rozjezd a dojezd vozíku. Z grafu je možno vyčíst, kdy byl ovládací software vozíku zapnutý a kdy vypnutý. Na ose x je krok vzorkování. Měření probíhalo po dobu pěti minut. Na ose y je amplituda v LSB. Při rozjezdu a dojezdu vozíku je šum na úrovni 20 LSB, to odpovídá 5,2 nm. Při samotném pojezdu je šum na úrovni cca 5 LSB, to odpovídá cca 1,3 nm. Když je software motoru zapnutý, tak se šum pohybuje na úrovni cca 2 LSB a při vypnutém softwaru vozíku se šum pohybuje na úrovni 1 LSB.

Záznam z interferometru A a B je v grafu 7. Z grafu je možno vyčíst jakým směrem došlo k posunu vozíku. Záznam interferometru A klesá, to znamená, že jeho vzdálenost se zkracovala a interferometr B roste, takže se vzdálenost zvětšovala. Na ose x je opět krok vzorkování a na ose y amplituda v LSB.

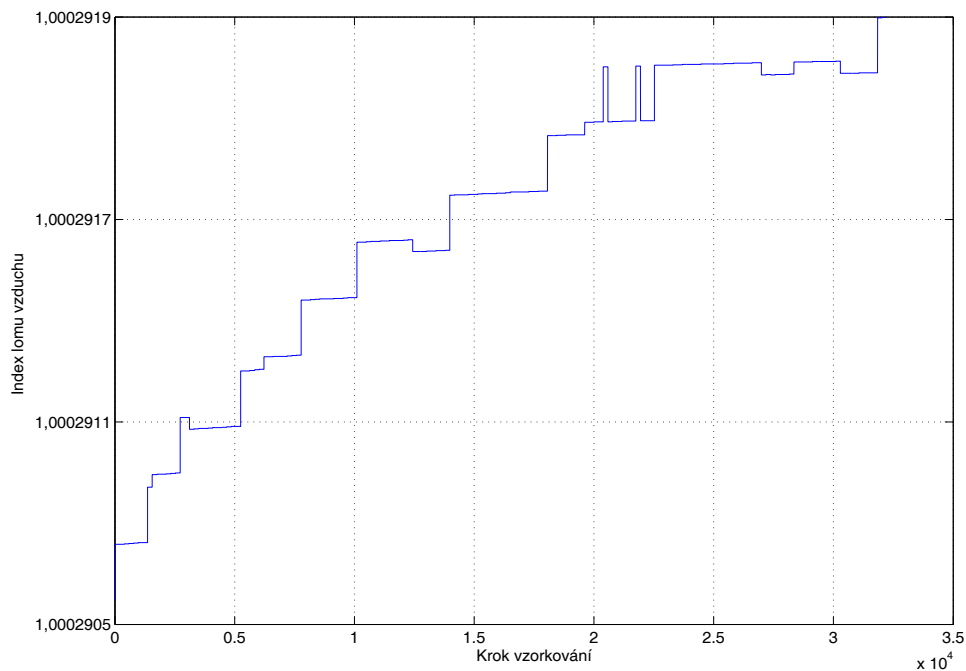
V grafu 8 je průběh změny indexu lomu vzduchu. Průběh má rostoucí charakter, který je způsoben driftem parametrů atmosféry uvnitř termostatické skříně.



Graf 6: Záznam z interferometru C při pojezdu



Graf 7: Záznam z interferometru A a B



Graf 8: *Změna indexu lomu vzduchu při pojezdu*

Záznamy grafů 6, 7 a 8 demonstrují, že celý systém v této konfiguraci je použitelný pro reálné odměřování vzdáleností. Výstup ze součtového interferometru C, který ovšem není aritmetickým součtem výstupů A a B, ale v naší optické sestavě je samostatným nezávisle měřeným výstupem, vykazuje příjemně malé změny výstupní hodnoty a i snesitelně malou citlivost k vibracím pohyblivé části interferometru. Dlouhodobě rostoucí trend koresponduje s driftem indexu lomu a středně rychlé změny jsou svou velikostí velmi podobné změnám v grafu 4, takže je lze přičíst opět indexu lomu vzduchu a nikoli geometrickým chybám posuvu.

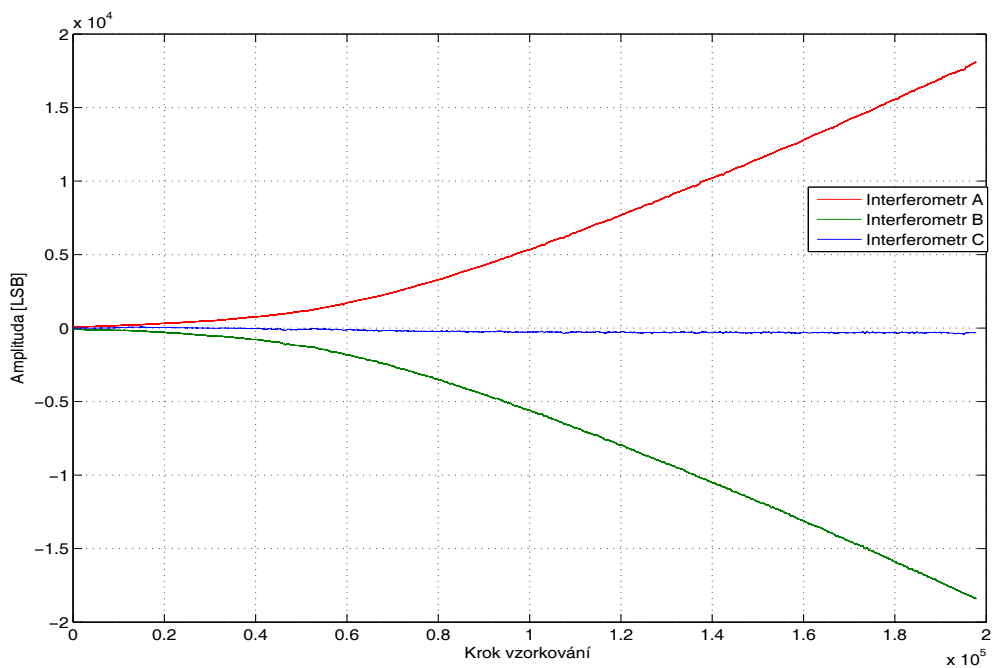
#### 6.2.4 Záznam interferometru při změně teploty – ohřev

Při tomto měření jsem měnila parametry atmosféry uvnitř termostatické skříně pomocí čerpadla a chladiče/ohříváče. Čerpadlo umožňuje cirkulaci vody a ohříváč změnu její teploty.

V grafu 9 je zaznamenán průběh interferometrů se zvyšující se teplotou uvnitř termostatické skříně. Interferometr A s rostoucí teplotou roste, interferometr B

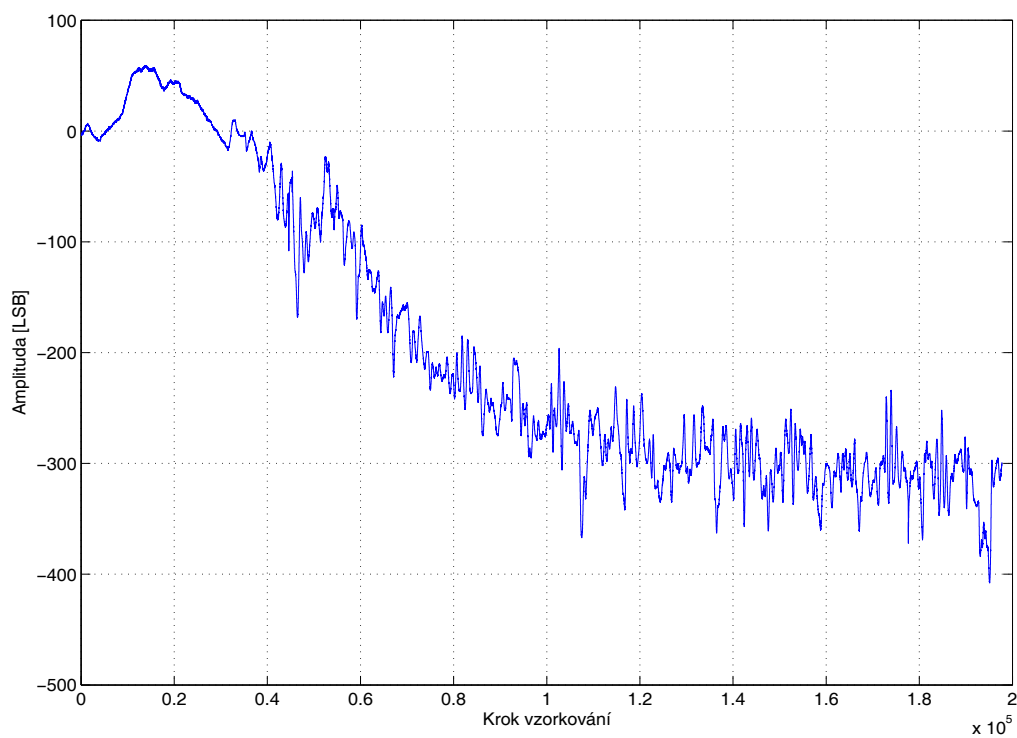
s rostoucí teplotou klesá a interferometr C je stabilní. Na ose x je krok vzorkování a na ose y amplituda v LSB. V tomto případě měření trvalo přibližně třicet minut a teplota uvnitř termostatické skříně se změnila o 2 °C. V grafu 9a je znázorněn samotný záznam interferometru C. Při měření došlo k jeho změně o 300 LSB, to odpovídá 78 nm.

Změna indexu lomu vzduchu při růstu teploty je v grafu 10. Z průběhu je patrné, že index lomu vzduchu se s rostoucí teplotou snižuje. S rostoucí teplotou roste tlak a koncentrace CO<sub>2</sub>, naopak vlhkost klesá. Tyto parametry nám také ovlivňují výslednou hodnotu indexu lomu vzduchu. Skokové změny, které jsou patrné na průběhu indexu lomu vzduchu, jsou způsobeny změnou tlaku a koncentrace CO<sub>2</sub>. Měřicí přístroje, které jsem použila pro jejich měření nemají, bohužel, rozlišení nutné pro tak malé změny indexu lomu vzduchu, jaké zde sledujeme. Z tohoto důvodu dochází k těmto skokovým změnám. Změna indexu lomu vzduchu je přesto nejvíce závislá na změně teploty.

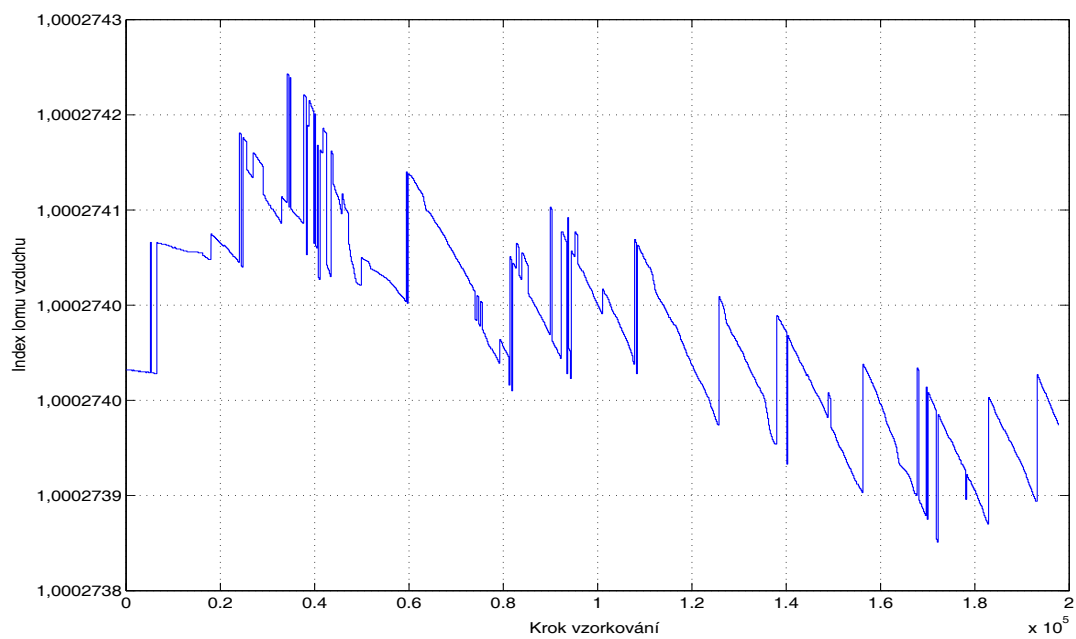


Graf 9: Záznam interferometrů při změně teploty – ohřev





Graf 9a: Záznam interferometru „C“, měřícího celkovou délku při změně teploty – ohřev



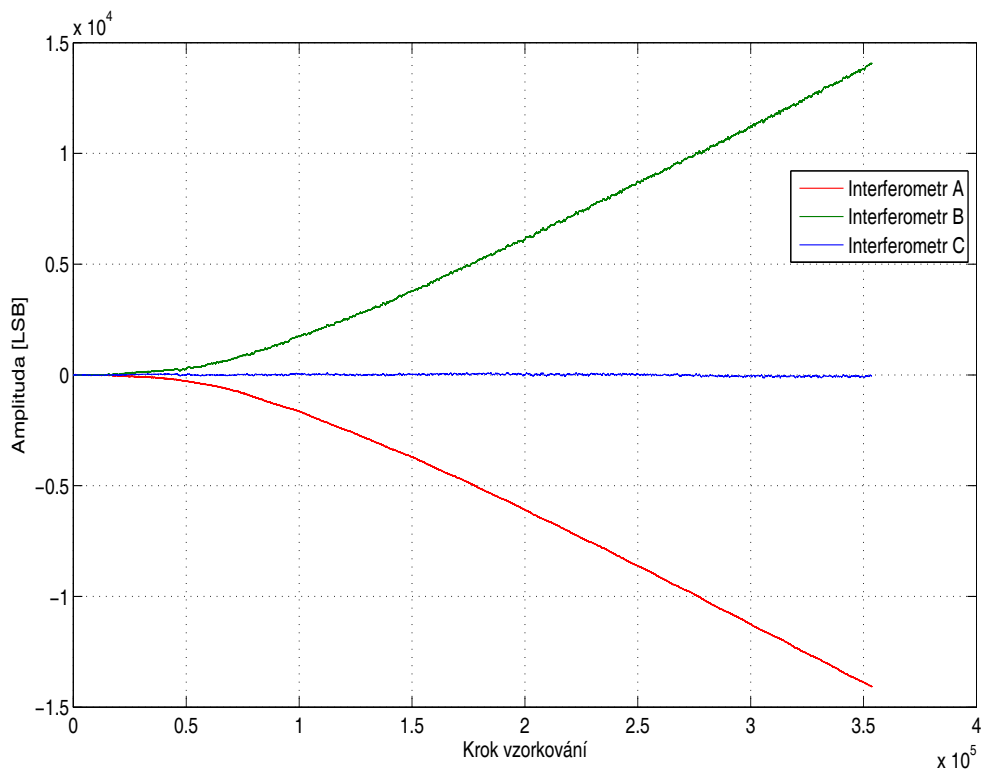
Graf 10: Změna indexu lomu vzduchu při růstu teploty

### 6.2.5 Záznam interferometru při změně teploty – chlazení

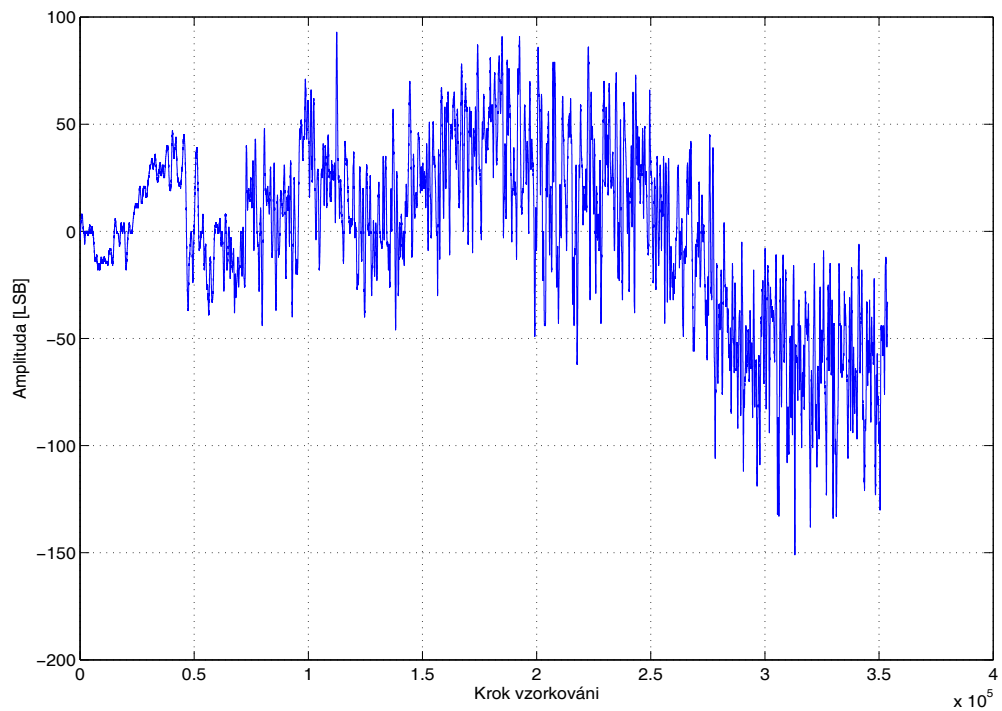
Při tomto měření jsem opět měnila parametry atmosféry pomocí čerpadla a chladiče/ohřívače, takže jsem snižovala teplotu uvnitř termostatické skříně.

V grafu 11 je zaznamenán průběh z interferometrů. Se snižující se teplotou interferometr B roste, interferometr A klesá a interferometr C je stabilní. Na ose x je krok vzorkování a na ose y amplituda v LSB. Měření trvalo cca 1 hodinu a teplota klesla uvnitř termostatické skříně o cca 1,2 °C. V grafu 11a je záznam samotného interferometru C. Při měření došlo ke změně o 50 LSB, to odpovídá 13 nm.

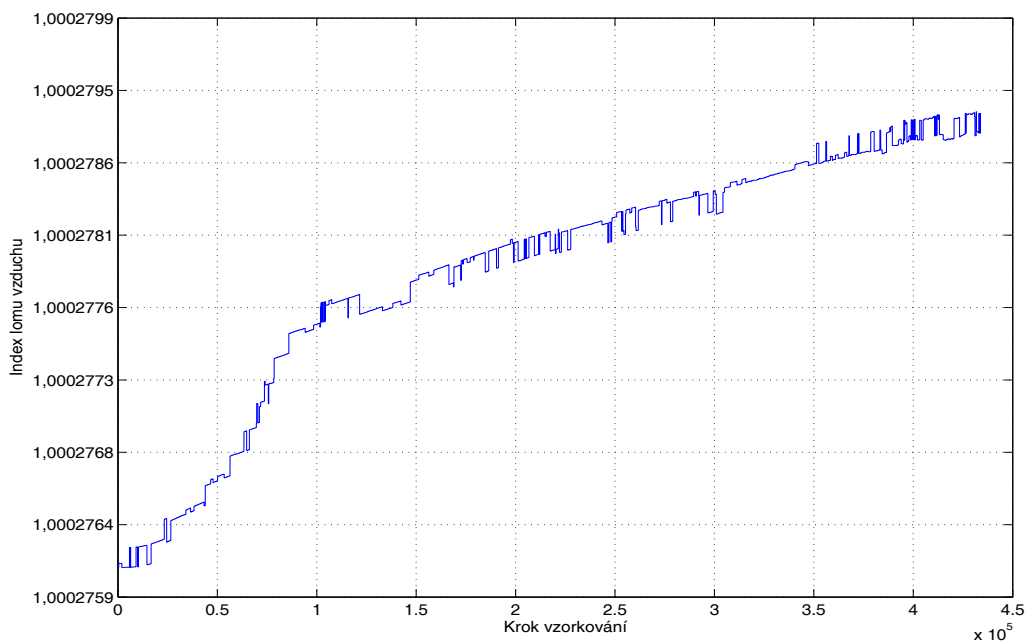
Změna indexu lomu vzduchu při poklesu teploty je v grafu 12. Z průběhu je patrné, že index lomu vzduchu s poklesem teploty roste. S poklesem teploty roste tlak a vlhkost, naopak koncentrace CO<sub>2</sub> klesá. Tyto parametry nám také ovlivňují výslednou hodnotu indexu lomu vzduchu. Skokové změny, které jsou patrné v průběhu změny indexu lomu vzduchu jsou způsobeny měřicími přístroji tlaku a CO<sub>2</sub> s příliš hrubým rozlišením. Na změnu indexu lomu má největší vliv změna teploty.



Graf 11: Záznam interferometrů při změně teploty – chlazení



Graf 11a Záznam interferometru „C“, měřícího celkovou délku při změně teploty – ohřev



Graf 12: Změna indexu lomu vzduchu při snižování teploty

Ze záznamů řízené změny indexu lomu vyplývá především fakt, že záznam interferometru C, který udává celkovou délku rozsahu velmi dobře sleduje změny indexu lomu. Při celkové optické délce dráhy 42 cm je změna optické délky v důsledku změny indexu lomu 78 nm, což odpovídá relativní změně  $1,9 \times 10^{-7}$  při ohřevu vzduchu ve skříní a 13 nm, což odpovídá relativní změně  $3,1 \times 10^{-8}$  při chlazení vzduchu ve skříní.

Záznamy změn indexu lomu poukazují na fakt, jak hrubé a málo citlivé může být určování indexu lomu nepřímou metodou prostřednictvím Edlénovy formule. Měřicí přístroje, které jsem použila (stanice Vaisala i měřič koncentrace  $\text{CO}_2$ ) jsou velmi drahé a v primární metrologii délky běžně používané právě pro tento účel. Chci-li se dobrat alespoň orientační hodnoty změny indexu lomu jiným, nezávislým způsobem, než je výstup z interferometru C (jinak fakticky sledovacího, „tracking“ refraktometru), nezbývá, než záznam na grafech 10 a 12 alespoň orientačně proložit přímkou a celkovou změnu odhadnout. V prvním případě je relativní změna indexu lomu  $5,8 \times 10^{-8}$ , ve druhém pak  $1,1 \times 10^{-6}$ . Jsou to hodnoty, které celkem korespondují s relativními změnami optické délky zaznamenanými interferometrem C. K plné shodě sice nedošlo, ale ani nemohlo, v soustavě je stále řada dalších vlivů, které nešlo úplně postihnout. Vlastní prostřední interferometrická jednotka umístěná na pohyblivém vozíku je z technologických důvodů vyrobena ze skla jenž nemá nijak malou teplotní roztažnost. Navíc rychlost ohřívání i chlazení nebyla zcela lineární, vykazovala pomalejší náběh. Různá tepelná kapacita částí mojí sestavy se tím pádem zahřívala různě rychle a vnášela do měření další chyby. Každopádně ale uvedená shoda potvrzuje funkčnost metody.

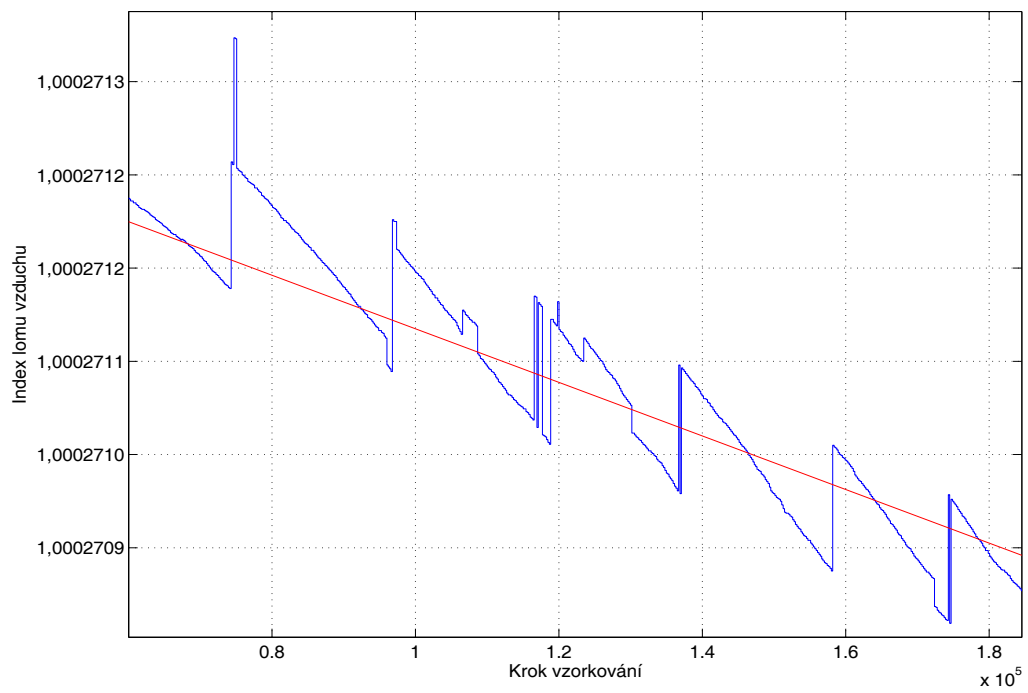
Zajímavé jsou také záznamy z interferometrů A a B. Z grafů 9 a 11 je zřejmé, že jejich hodnoty narůstají, resp. klesají proti sobě. Vyplývá z toho, že mechanická stabilita posuvu a vozíku je velmi špatná, teplotní dilatací se šroub unašeče vozíku roztahuje, resp. zkracuje. To je patrné z toho, že interferometr A roste při ohřevu, zatímco B klesá a při chlazení je tomu naopak. Dále z toho plyne, že spoléhat na aritmetický součet  $A + B$  pro určení změny indexu lomu, jak tomu bylo v konceptu, není spolehlivé, zatímco výstup z C je náležitě stabilní i při posuvu vozíku se střední interferometrickou jednotkou se všemi vibracemi a úhlovými chybami, které vozík při pohybu vykazuje. Přitom dráha svazků interferometru C je s A i B přímo totožná.

Reálné použití systému pro měření s kompenzací vlivu změn indexu lomu by jednak vyžadovalo vyrobít prostřední interferometrickou jednotku také z materiálu s minimální teplotní roztažností. Zerodur pro své ztráty při průchodu světla pro to není vhodný, ale např. ULE (Ultra Low Expansion) od firmy Corning by snad použitelný byl, nebo alespoň křemenné sklo. Oboje bylo ale z důvodů ceny a doby nutné k výrobě mimo možnosti projektu. Vlastní kompenzace by dále vyžadovala přesnou znalost jak celkové vzduchové dráhy interferometru C, tak i absolutní výchozí hodnoty interferometrů A a B. V naší sestavě změřit absolutní délku C a vyčíslit pak relativní změny vlivem indexu lomu bylo snadné, ale u délek A a B už by to bylo obtížnější. Výchozí polohy jsem neznala a před začátkem měření interferometry nulovala. Naměřené údaje A a B by se pak kompenzovaly o relativní změnu odvozenou od relativní změny zaznamenané interferometrem C.

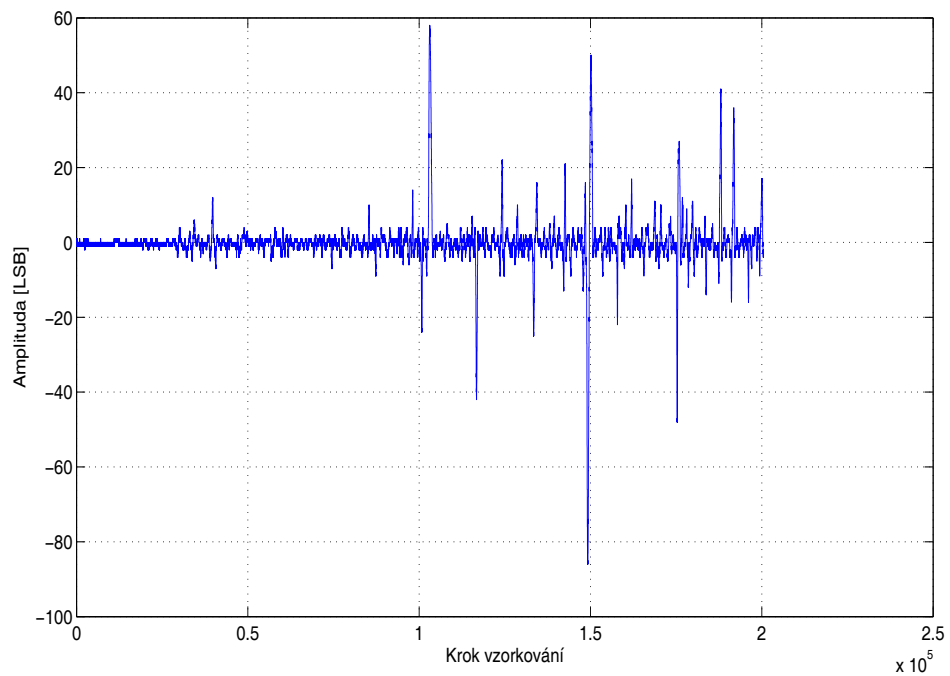
### **6.2.6 Změna indexu lomu v závislosti na vlnové délce laserového zdroje**

Poslední měření které jsem provedla byl záznam změny indexu lomu vzduchu ve srovnání se změnou optické frekvence laserového zdroje v režimu stabilizace jeho vzduchové vlnové délky. Vlnovou délku laserového zdroje jsem stabilizovala vůči mechanické délce interferometru C. Přeladění laseru jsem měla k dispozici prostřednictvím PZT elementu v rozmezí napětí od +100 V do - 100 V. Vlnová délka laserového zdroje při přeladění +100 V PZT byla 532,24326 nm a při přeladění - 100 V PZT byla 532,24373 nm. Tyto hodnoty jsem změřila pomocí vlnoměru. Tomu odpovídá změna optického kmitočtu od 563,65204 THz do 563,65154 THz.

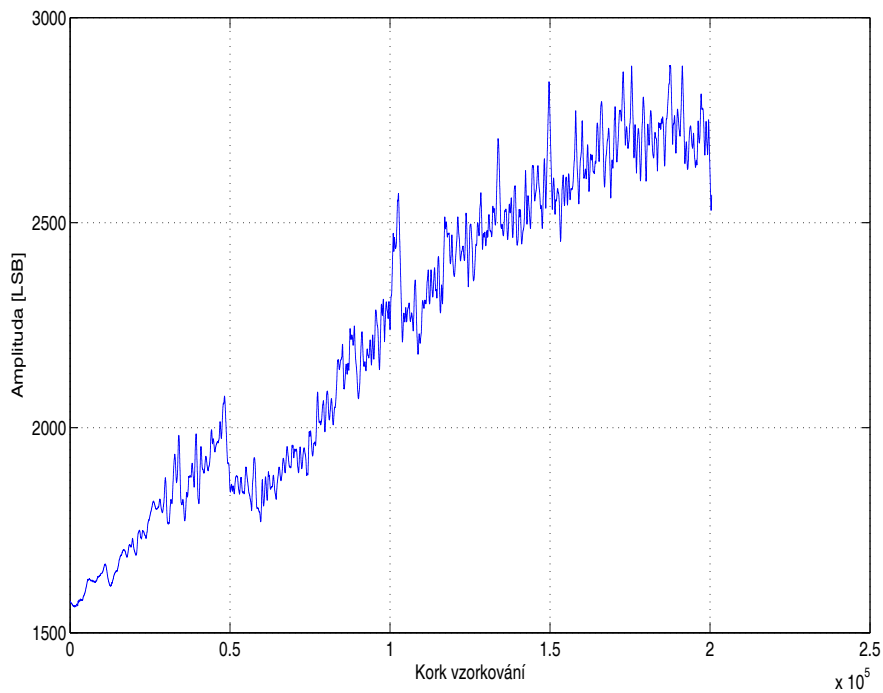
Sestava pro stabilizaci vlnové délky byla uspořádána tak, že výstup z interferometru C zaznamenávaný on-line počítačem byl v programu vytvořeném v prostředí LabVIEW přiveden na D/A kartu a převeden do analogové podoby. Na něj jsem připojila kartu vysokonapěťového zesilovače, která je vybavena též proporcionálně-integračním regulátorem. To mi umožnilo přes PZT v laseru řídit optický kmitočet laseru tak, aby výstup z interferometru C byl stále nulový při změně teploty ve skříni a driftu indexu lomu vzduchu. Tím jsem realizovala stabilizaci vlnové délky.



Graf: 13 Změna indexu lomu vzduchu při stabilizaci vlnové délky laserového zdroje



Graf 14: Záznam z interferometru C při stabilizaci vlnové délky



Graf 15: *Regulace napětí*

Na grafu 13 je záznam změny indexu lomu ve skříně při ohřevu skříně, graf 14 ukazuje na konstantní, nulovou hodnotu výstupu z interferometru C v důsledku stabilizace vlnové délky (fluktuační se zde samozřejmě vyskytují, regulační smyčka má omezenou rychlost) a na grafu 15 je vidět, jak byl laděn optický kmitočet laseru, aby se udržovala konstantní vlnová délka v podmínkách měnícího se indexu lomu vzduchu. Relativní změna indexu lomu vzduchu je v průběhu ohřevu o  $5,6 \times 10^{-7}$ , což přiměřeně koresponduje se změnou optického kmitočtu o  $5 \times 10^{-5}$ . Na grafu 15 představuje 1 LSB 9,09 V řídicího napětí na PZT, což odpovídá změně optického kmitočtu laseru o 5,5 MHz. Tyto záznamy ukazují, že stabilizace vlnové délky funguje a v tomto režimu můžeme pokládat hodnoty délky měřené interferometry A a B za nezávislé na změnách indexu lomu vzduchu, protože měříme při konstantní vzduchové vlnové délce.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo experimentálně ověřit princip kompenzace vlivu změn indexu lomu vzduchu v ose měření prostřednictvím stabilizace vlnové délky laseru ve vzduchu, prověřit funkčnost tohoto konceptu a jeho reálnou použitelnost při interferometrickém měření vzdáleností.

Navázala jsem na výsledky, kterých jsem dosáhla v rámci své bakalářské práce, kdy byla vytvořena experimentální sestava základního interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu. Pomocí termostatické skříně jsem byla schopna měnit parametry atmosféry a tím měnit index lomu vzduchu, který jsem pro srovnání určovala také nepřímo z Edlénovy rovnice.

V diplomové práci jsem se ubírala dvěma cestami. První byl vývoj transparentního detektoru díky němuž by bylo možno měřit polohu ve stojaté vlně v pasivním Fabryho-Perotově rezonátoru a tím v něm stabilizovat vlnovou délku. Bylo provedeno několik pokusů vytvořit takovýto transparentní fotodetektor ve spolupráci z FZÚ a detekovat jím stojaté vlny. Pro tento účel byla vytvořena experimentální sestava Fabryho-Perotova rezonátoru a v něm jsem se snažila detekovat interferenční maxima a minima při posuvu transparentního detektoru. Výsledný signál reprezentující střídající se interferenční maxima a minima se bohužel pohyboval na úrovni jen o něco málo vyšší, než byla hladina šumu. Pravděpodobné vysvětlení spočítá v technologii výroby transparentního fotodetektoru, jak je podrobně popsáno v příslušné kapitole. Další vývoj fotodetektoru ve spolupráci FZÚ nadále probíhá.

Dále jsem se zabývala novým uspořádáním interferometru, který není díky koutovému odrazeči zatížen citlivostí k úhlovým chybám. Toto uspořádání interferometru je unikátní třemi nezávislými výstupy. S tímto interferometrem jsem provedla celkem šest měření, která úspěšně ověřila funkci interferometru a koncept kompenzace vlivu změn indexu lomu vzduchu. Závěry jednotlivých měření uvádím na konci každé kapitoly.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MALÝ, Petr.: *Optika*. 1.vyd. UK v Praze: Karolinum, 2008. 361 s.  
ISBN 978-80-246-1342-0.
- [2] JEXO VÁ, Soňa.: *Vybrané kapitoly z geometrické a vlnové optiky – Interference světla*. Česká oční optika, 2, 52-56 s., 2008.
- [3] POSPÍŠIL, Jaroslav.: *Základy vlnové optiky (část A)*. VUP Olomouc, 1990. 293 s.
- [4] VÉMOLA, Tomáš.: *Soustava Fabry-Perotova a Michelsonova interferometru pro měření délek s femtosekundovým laserem - diplomová práce*. VUT Brno, 2011. 99 s.
- [5] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C.: *Základy fotoniky - svazek 1*. 1.vyd. UK v Praze: MATFYZPRESS, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [6] FUKA, J., HAVELKA, B.: *I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV.*, SPN Praha 1961.
- [7] SLÁDKOVÁ, J.: *Populární přednášky o fyzice - Interference světla - svazek 15*, SNTL Praha 1967, 152 s.
- [8] ČÍP, Ondřej, BUCHTA, Zdeněk.: *Přesné měření délek pomocí laserové interferometru – učební texty k semináři*. ÚPT AV ČR, v.v.i., 2011.

- [9] BOBROFF, Norman.: *Recent advances in displacement measuring interferometry*. Measurement Science and Technology, 3, 907-926 s., 1993.
- [10] GRECO, V., MOLESINI, G., QUERCIOLO, F.: *Accurate polarization interferometer*. Rev. Sci. Instrum, 66, 3729-3734 s., 1995.
- [11] ČÍP, Ondřej, PETRŮ, František.: *A scale-linearization method for precise laser interferometry*, Measurement Science and Technology, 11 133-141 s., 2000.
- [12] VRBOVÁ, M., JELÍNKOVÁ, H., GAVRILOV, P.: *Úvod do laserové techniky*. Vydavatelství ČVUT, 1998. 228 s. ISBN 80-01-01108-9.
- [13] BÜCHNER H-J, at. al.: *An optical standing-wave interferometer for displacement measurements*. Meas. Sci. Technol. 313-316 s., 2003.
- [14] FÍRA, R.: *Index lomu vzduchu*. Jemná mechanika a optika 7-8, 218-221 s., 1996.
- [15] EDLÉN, B.: *The refractive index of air*. Metrologia 2. 71- 80 s., 1966.
- [16] HOLÁ, M.: *Interferometrie s kompenzací fluktuací indexu lomu vzduchu – experimentální ověření principu – bakalářská práce*. UP Olomouc, 2010, 44 s.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1      Konstruktivní interference (světelné vlny jsou ve fázi)
- Obr. 2      Destruktivní interference (světelné vlny jsou v protifázi)
- Obr. 3      Schéma mnohosvazkové interference
- Obr. 4      Schématické uspořádání Michelsonova interferometru
- Obr. 5      Schématické uspořádání Machova–Zehnderova interferometru
- Obr. 6      Schématické uspořádání Fabryova-Perotova interferometru
- Obr. 7      Schéma principu homodynní detekce, převzato z [6]
- Obr. 8      Vyobrazení signálu z detekční jednotky, převzato z [6]
- Obr. 9      Diagram stability, převzato z [7]
- Obr. 10      Vznik stojaté vlny na rovinném zrcadle
- Obr. 11      Schéma klasického interferometru
- Obr. 12      Schéma interferometru s konstantní délkou
- Obr. 13      Principiální schéma interferometru s kompenzací indexu lomu vzduchu
- Obr. 14      Schéma interferometrické jednotky
- Obr. 15      Schéma interferometrické sestavy 1
- Obr. 16      První sestava interferometru, převzato z [11]
- Obr. 17      Interferometrická jednotky – teplotně kompenzovaná
- Obr. 18      Interferometrická jednotky spolu s kolimátorem v titanovém pouzdře
- Obr. 19      Schéma interferometrické sestavy 2
- Obr. 20      Druhá sestava interferometru
- Obr. 21      Teplotní kompenzace interferometrické jednotky
- Obr. 22      Schématické znázornění eliminace kosinové chyby

- Obr. 23 Schématické znázornění nastavení rovnoběžnosti svazků
- Obr. 24 Termostatická skříň – schéma
- Obr. 25 Termostatická skříň
- Obr. 26 Schéma ladění optické frekvence He-Ne laseru
- Obr. 27 Rezonátor - schématické uspořádání
- Obr. 28 Rezonátor
- Obr. 29a Transparentní fotodetektor 1a
- Obr. 29 Transparentní fotodetektor 1
- Obr. 30a Spektrum propustnosti transparentního fotodetektoru optimalizovaného pro vlnovou délku 532 nm, podle modelu
- Obr. 30b Záznam spektra propustnosti transparentního fotodetektoru
- Obr. 30 Transparentní fotodetektor 2
- Obr. 31 Schéma zesilovače 1
- Obr. 32 Deska plošných spojů pro zesilovači 1
- Obr. 33 Schéma zesilovače 2
- Obr. 34 Deska plošných spojů pro zesilovač 2
- Obr. 35 Schéma dvojitého zesilovače
- Obr. 36 Deska plošných spojů pro dvojitý zesilovač
- Obr. 37 Schéma řízení délky rezonátoru
- Obr. 38 Fotodetektor v pasivním rezonátoru
- Obr. 39 Principiální schéma interferometru se třemi výstupy
- Obr. 40 Interferometrická sestava se třemi výstupy
- Obr. 41 Třetí sestava interferometru

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

### Použité zkratky

- ÚPT Ústav přístrojové techniky Akademie věd ČR, v.v.i.
- VUT Vysoké učení technické v Brně
- FZÚ Fyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i.
- PZT piezoelektrický měnič
- TEM příčná elektrická a magnetická složka. Způsob značení módů v rezonátorech a laserech.
- AR antireflexní vrstva
- ČMI Český metrologický institut
- LSB kvantovací krok

### Použité veličiny

- $\lambda$  vlnová délka světla
- $\nu$  frekvence
- $E, \vec{E}$  intenzita elektrického pole, vektor intenzity elektrického pole
- $I$  světelná intenzita
- $\Delta l, \Delta\varphi$  fázový rozdíl
- $k$  vlnové číslo
- $A$  amplituda elektrické intenzity
- $\varphi$  fáze vlny
- $V$  kontrast interferenčních proužků
- $R$  odrazivost povrchu

$T$	propustnost povrchu
$\theta$	úhel mezi směry šíření dvou světelných rovinných vln
$m$	celé číslo
$F$	činitel jemnosti
$I_x, I_y$	elektrická intenzita signálu v kvadratuře
$t$	čas
$U$	energie rezonátoru
$\tau_c$	časový interval
$c$	rychlost světla ve vakuu
$L$	délka rezonátoru, vzdálenost
$Q$	činitel jakosti
$\nu_r$	rezonanční frekvence
$N_F$	Fresnelovo číslo
$r$	poloměr kulové plochy
$a$	průměr apertury
$G_1, G_2$	podobnostní parametr charakterizující difrakční ztráty
$g_1, g_2$	geometrické parametry rezonátoru
$\omega$	úhlová frekvence
$\varepsilon_r$	relativní permitivita
$\varepsilon_0$	permitivita vakua
$\lambda_0$	vlnová délka ve vakuu
$c_{air}$	rychlost světla ve vzduchu

$n$	index lomu vzduchu
$p$	tlak
$RH$	relativní vlhkost vzduchu
$\sigma$	vlnočet
$K_\lambda$	disperzní člen
$D_{tp}$	člen hustoty
$\alpha$	konstanta
$\varepsilon_t$	faktor zohledňující neideálnost plynu
$n_{tph}$	člen obsahující tlak vodních par
$(n-1)_t$	člen zohledňující obsah CO <sub>2</sub>
$\lambda_{prost.}$	vlnová délka měřená ve vzduchu
$L$	délka měřicího ramene interferometru
$\varepsilon$	rozdíl měřené a skutečné vzdálenosti
$\beta$	úhel náklonu zrcadla