

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO
V OLOMOUCI
SPOLEČNÁ LABORATOŘ OPTIKY



**Konstrukce vláknového
Machova-Zehnderova
interferometru se dvěma děliči
s proměnnými dělicími poměry**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Marek Bula

Vedoucí práce

Mgr. Karel Lemr, Ph.D.

OLOMOUC

ČERVENEC 2012

Práce byla odevzdána dne . července 2012

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval samostatně a pouze s použitím uvedené literatury. Souhlasím se zveřejněním této práce v knihovně a na internetových stránkách UP v Olomouci a jejích pracovištích.

.....

Vypracoval: Marek Bula
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Karel Lemr, Ph.D.
Obor: Optika a optoelektronika

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Mgr. Karlu Lemrovi, Ph.D., za dobré nápady, trpělivost a svědomitý přístup k vedení této práce. Dále patří poděkování Mgr. Evě Halenkové za příjemně strávený čas v laboratoři a Mgr. Antonínu Černochovi, Ph.D., za cenné rady. V neposlední řadě děkuji velmi mým prarodičům, kteří mi umožnili studovat.

Obsah

1 Úvod	2
1.1 Interference	2
1.2 Matematický popis	3
1.3 Interferometry	6
1.4 Machův-Zehnderův interferometr	7
1.4.1 Matematický popis ideálního dvoumódového děliče	10
2 Sestavení interferometru	11
2.1 Experimentální uspořádání	11
2.2 Softwarové vybavení	13
3 Měření a výsledky	14
3.1 Justáž děliče	14
3.2 Závislost dělicího poměru na posuvu mikrošroubu	14
3.3 Závislost dělicího poměru na polarizaci signálu	16
3.4 Justáž interferometru	19
3.5 Závislost vizibility na dělicím poměru $T_2 : R_2$	20
3.6 Stabilita fáze interferometru	22
4 Závěr	25
Conclusions	26
Literatura	27

Kapitola 1

Úvod

„Interference (angl. to interfere, setkatí se), čes. dle Smetany křížení, nazývá se úkaz, jenž se vyskytuje při pohybování vlnivém, když na částky ústředí současně přenášeny bývají ruchy ze dvou původů.“ [1]

1.1 Interference

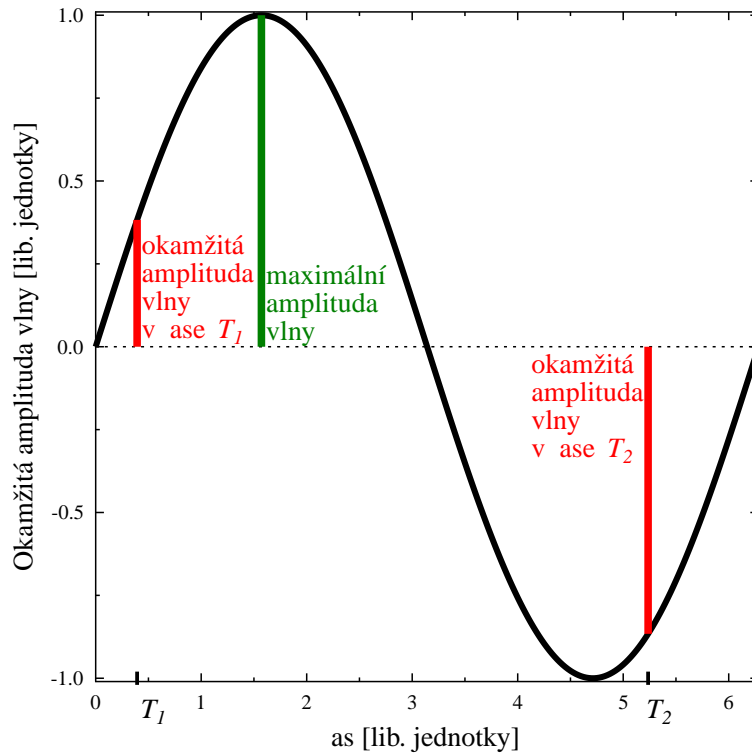
Interference je v celé fyzice významným jevem. Pozorujeme ji při střetu dvou a více vln, speciálně v optice vln elektromagnetických. Pro pochopení principu interference je důležité zavést pojem okamžitá amplituda vlny, která se s časem mění. Její maximální výchylce pak říkáme maximální amplituda vlny, jak je znázorněno na obrázku 1.1 [2].

Důležitým kritériem rozdělení typů interference je počet vstupujících vln, kdy předně rozlišujeme dva případy: interferenci dvou vln či mnohonásobnou interferenci, ve které můžeme uvažovat až nekonečně mnoho vln [2]. Pro účely popisu Machova-Zehnderova interferometru, kterému se věnuje tato práce, uvažujeme dvě interferující vlny.

Při skládání okamžitých amplitud interferujících vln kvalitativně rozlišujeme konstruktivní, resp. destruktivní interferenci, kdy výsledná maximální amplituda je větší resp. menší než větší z obou maximálních amplitud vstupních vln, což je ilustrováno na obrázku 1.2a, resp. na obrázku 1.2b [3]. Z těchto úvah je patrné, že výsledná amplituda nemusí být součtem resp. rozdílem maximálních amplitud vstupních vln, což je, jak ukážeme dále, stěžejním jevem [2].

Míra interference jednotlivých vln závisí na jejich polarizaci, na jejich spektrách či na stabilitě zdroje a pod. Jestliže jsou vlny schopny interferovat, nazýváme je koherentními vlnami [2].

Interference nachází široké uplatnění v radio astronomii, spektroskopii, met-



Obrázek 1.1: *Charakteristika vlny*

rologii, holografii, při zpracování obrazu z teleskopu, při vývoji reflexních vrstev, při kontrole kvality ploch (rovinných, kulových, asférických a jiných), při justáži velmi přesných optických soustav, při rozpoznávání krystalů, či dokonce místo gyroskopu v bojových letounech (Sagnacův interferometr) [3, 4].

1.2 Matematický popis

Ke kvantitativnímu studiu interference použijeme matematický aparát vlnové optiky [2], který je pro tyto účely vhodný.

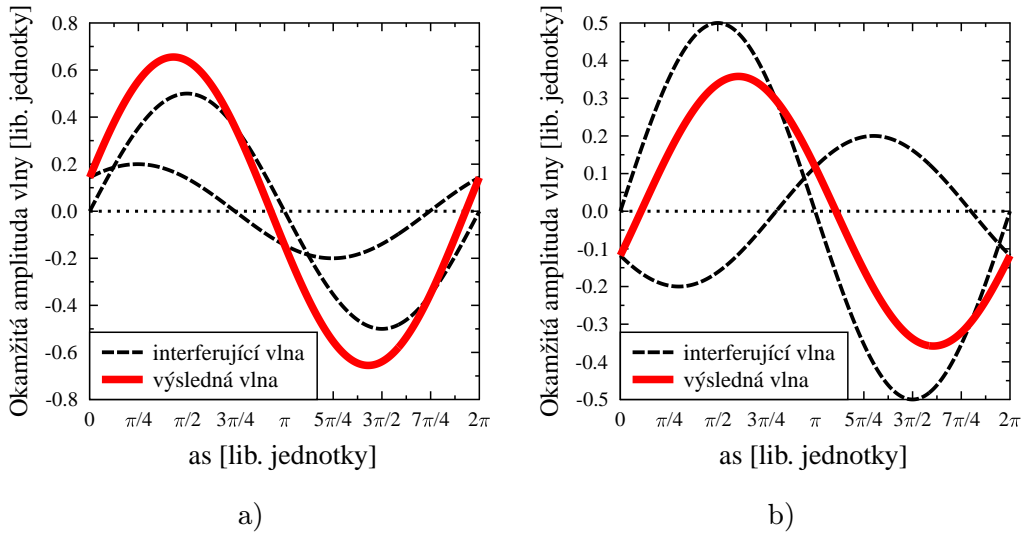
Světlo, tedy elektromagnetické záření, popisujeme pomocí vektoru elektrické intenzity

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \tag{1.1}$$

a magnetické intenzity

$$\vec{H}(\vec{r}, t). \tag{1.2}$$

Obecně jsou tyto vektory funkcí polohy a času [5]. Pro názornost a jednoduchost, a to aniž bychom ovlivnili správnost následujícího popisu interference



Obrázek 1.2: a) konstruktivní interference, b) destruktivní interference

dvou elektromagnetický vln, se omezíme na monochromatické rovinné vlny v nemagnetickém prostředí šířící se pouze ve směru osy z a mající stejné frekvence. Při této aproximaci s výhodou používáme k popisu elektromagnetické vlny skalární komplexní amplitudu

$$U(z, t) = Ae^{i(\omega t - kz)}, \quad (1.3)$$

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

$$\omega = 2\pi f,$$

přičemž f je frekvence vlny [2, 3]. I když by k popisu stačily pouze reálné veličiny, ukazuje se však, že komplexní amplituda je efektivní nástroj k řešení tohoto typu úloh [3].

Při interferenci dochází k součtu okamžitých amplitud jednotlivých vln, což zapíšeme vztahem

$$U = U_1 + U_2, \quad (1.4)$$

kde U je okamžitá amplituda výstupní vlny a U_1, U_2 popisují interferující vlny. Předpokládejme, že jedna z vln bude vůči druhé časově opožděna o interval t_z . Po dosazení vztahu (1.3) do (1.4) obdržíme [2]

$$\begin{aligned} U &= A_1 e^{i(\omega t - kz)} + A_2 e^{i(\omega(t+t_z) - kz)}, \\ U &= e^{i(\omega t - kz)} (A_1 + A_2 e^{i\varphi}), \end{aligned} \quad (1.5)$$

kde jsme zavedli fázový posuv jako

$$\varphi = \omega t_z.$$

Většina optických detektorů měří střední hodnotu výkonu [6], tedy energii, kterou vlna přenáší. Zavedme proto veličinu intenzity, jež je definována jako časově středovaná hodnota energie vlny, který protéká za jednotku času jednotkovým plošným obsahem [3]

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \langle E^2 \rangle, \quad (1.6)$$

kde c je rychlost světla, μ je permeabilita prostředí a ε permitivita prostředí. Středování uvažujeme právě kvůli omezením optických detektorů světla. V naší aproximaci pomocí skalární komplexní amplitudy U odpovídá vztah pro intenzitu

$$I = \langle |U|^2 \rangle. \quad (1.7)$$

S využitím této definice lze spočítat teoretickou hodnotu, kterou bychom měli pozorovat na detektoru. S pomocí vztahů (1.5) a (1.7) odvodíme vztah pro výslednou intenzitu dvou interferujících vln

$$\begin{aligned} I &= \langle |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_1 U_2^* \rangle \\ I &= I_1 + I_2 + \langle 2A_1 A_2 \cos(\varphi) \rangle, \end{aligned} \quad (1.8)$$

I_1 a I_2 označují intenzity interferujících vln. Časové středování u vztahu (1.8) mohu v našem případě vypustit:

$$I = I_1 + I_2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi), \quad (1.9)$$

protože tento není závislý na čase. Obecně však toto středování vypustit nelze. Podstatným výsledkem našich úvah je tzv. interferenční člen

$$2A_1 A_2 \cos(\varphi),$$

který nám určuje povahu interference [2]:

$$\varphi + 2n\pi \subset \begin{cases} \langle 0; \frac{1}{2}\pi \rangle \cup \langle \frac{3}{2}\pi; 2\pi \rangle & : I_v > I_1 + I_2 \quad \text{konstruktivní interference} \\ \frac{1}{2}\pi \vee \frac{3}{2}\pi & : I_v = I_1 + I_2 \\ \langle \frac{1}{2}; \frac{3}{2}\pi \rangle & : I_v < I_1 + I_2 \quad \text{destruktivní interference,} \end{cases}$$

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

1.3 Interferometry

Interferometrie zkoumá dráhové rozdíly koherentních vln. K těmto měřením využívá speciální přístroje, interferometry. Tyto přístroje byly v praxi využívány již v první polovině 19. století při určování koncentrace plynů v dolech. Ve vědě se prvně uplatňovaly především pro zlepšení rozlišení hvězdářských dalekohledů [1].

Dnes existuje pestrá paleta interferometrů zahrnující:

- Michelsonův interferometr [7]
- Michelsonův hvězdný interferometr [8]
- Fabryův-Perotův interferometr [9]
- Sférický interferometr [10]
- Sagnacův interferometr [11]
- Twyman-Greenův interferometr [12]
- Hanbury Brownův-Twissův interferometr [13]
- Machův-Zehnderův interferometr [14]

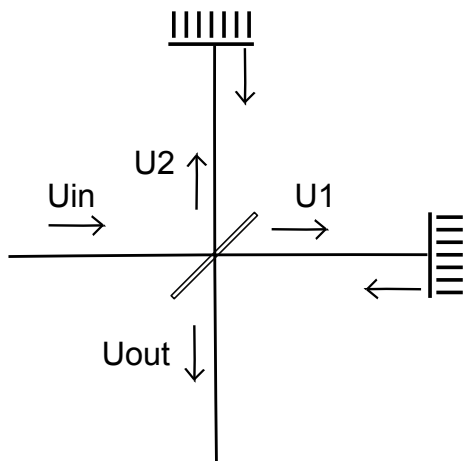
Abychom blíže demonstrovali princip interferometrů, vybrali jsme několik z nich k bližšímu popisu.

U interferometrů je často využíváno dělení vlny, zde rozlišujeme základní dva typy, a to amplitudové resp. vlnoplochové dělení, které dělí vstupní amplitudu resp. vlnoplochu vstupní vlny.

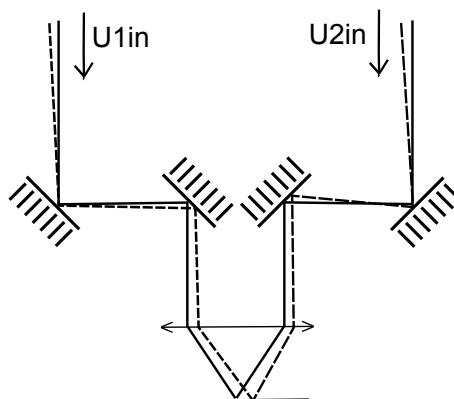
Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr se skládá z jednoho polopropustného zrcátka (děliče svazku) a dvou plně odrazných zrcátek, viz. obrázek 1.3. Vstupní vlna se na tomto děliči rozdělí na dvě, ty pak putují k zrcátkům, na kterých se odrazí zpět a při dopadu na polopropustný člen obě vlny interferují.

Nejznámější použití tohoto interferometru bylo v Michelsonově-Morleyho experimentu z roku 1887, který vyvracel existenci éteru [15].



Obrázek 1.3: Schéma Michelsonova interferometru



Obrázek 1.4: Schéma Michelsonova hvězdného interferometru

Michelsonův hvězdný interferometr

Michelsonův hvězdný interferometr, viz obrázek 1.4, byl v roce 1890 využit k měření průměru hvězdy Betelgeuse, která na obloze zabírá pouhých 0,047 úhlových sekund, avšak je větší, než je orbita Země kolem Slunce, její poloměr je $4,1 \times 10^8$ km [8].

Sagnacův interferometr

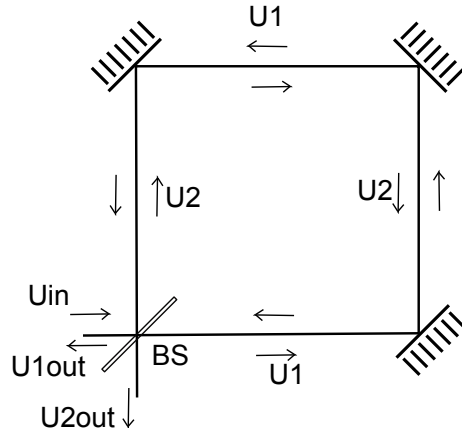
Toto uspořádání se také nazývá kruhový interferometr, je složen ze tří zcela odrazných zrcátek a jednoho děliče – to vše je v uzavřeném okruhu, viz obrázek 1.5

Tento interferometr bývá mnohdy upevněn na rotující platformu, jejíž osa otáčení musí být mimo smyčku interferometru. Rotace zavádí změnu fáze, ze které lze určit úhlovou rychlost platformy. V praxi je tento princip užíván místo gyroskopu a v GPS [16]. Dále je užíván např. jako přepínač pulzu [17].

1.4 Machův-Zehnderův interferometr

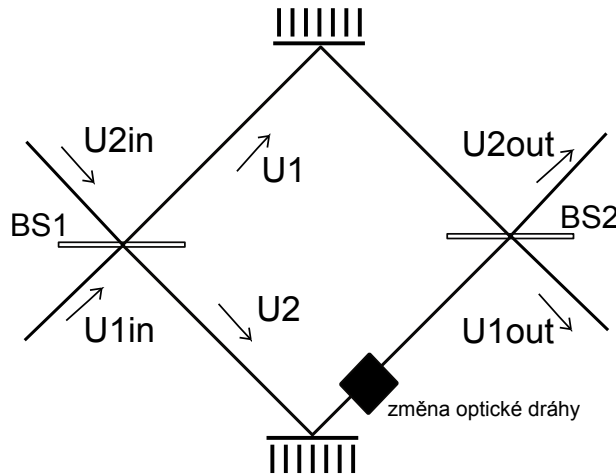
Machův-Zehnderův (M-Z) interferometr, jinak nazývaný „dvoucestný interferometr,“ je vynález Ludwiga Macha a Ludwiga Zehndera z roku 1891 [14] a stále často používaný nástroj. Jeho výhodou je značná variabilita – díky na sobě nezávislým ramenům můžeme do jednoho ramene různými způsoby zavádět změnu optické dráhy, tak jako je naznačeno v rovnici (1.5) [18].

Průmyslově se využívá například ve spektroskopii, ke kontrole kvality ploch, nebo k měření rychlosti proudícího vzduchu kolem křídla letadla [19]. Je také



Obrázek 1.5: Schéma Sagnacova interferometru; *BS* označuje dělič svazku

významným prvkem lineárních optických schémat pro kvantově informační pokusy. Jeho zřetěžením můžeme získat síť implementující pestrou paletu kvantově optických protokolů [20, 21].



Obrázek 1.6: Schéma obecného M-Z interferometru. *BS₁* a *BS₂* označují děliče svazku

Interferometr je složen ze dvou odrazných a dvou polopropustných zrcadel (děličů svazku), viz obrázek 1.6. V aplikacích se často využívá pouze jeden vstup U_{1in} , kterým projde vstupní vlna na dělič svazku BS_1 , kde se amplitudově rozdělí, část vstupní vlny se odrazí s koeficientem odrazivosti ρ_1 a zbytek projde s koeficientem propustnosti τ_1 , přičemž pro ideální dvoumódový dělič platí vztah [2]

$$|\rho|^2 + |\tau|^2 = 1 \quad (1.10)$$

Jedním ramenem putuje vlna

$$U_1 = \tau_1 U_{1\text{in}}, \quad (1.11)$$

která se odrazí od zrcadla a putuje k druhému děliči svazku BS₂. Vlnu ve druhém rameni lze popsat pomocí

$$U_2 = \rho_1 U_{1\text{in}}. \quad (1.12)$$

Zde dojde ke zpoždění, díky změně optické dráhy oproti prvnímu ramenu, což se projeví fázovým posunem $e^{i\varphi}$. Ve druhém rameni tedy putuje vlna

$$U_2 = \rho_1 e^{i\varphi} U_{1\text{in}}, \quad (1.13)$$

což bylo uvažováno i v rovnici (1.5). Díky možnosti změny fáze pozorujeme závislost výstupní intenzity na zavedeném fázovém posunu. Na děliči svazku BS₂ obě vlny interferují a to tak, že na jednom výstupu pozorujeme

$$U_{1\text{out}} = \tau_2 U_1 + \rho_2 U_2 = (\tau_2 \tau_1 + \rho_2 \rho_1 e^{i\varphi}) U_{1\text{in}} \quad (1.14)$$

a na druhém

$$U_{2\text{out}} = \tau_2 U_2 - \rho_2 U_1 = (\tau_2 \rho_1 e^{i\varphi} - \rho_2 \tau_1) U_{1\text{in}}. \quad (1.15)$$

Pro vyhodnocení míry interference, kterou poskytuje daný interferometr, zavádíme veličinu vizibilita (kontrast).

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, [2] \quad (1.16)$$

kde podle vztahu (1.9) je maximální pozorovaná intenzita

$$I_{\text{max}} = I_1 + I_2 + 2A_1 A_2 \quad (1.17)$$

za podmínky $\varphi = 2n\pi$ a minimální pozorovaná intenzita

$$I_{\text{min}} = I_1 + I_2 - 2A_1 A_2 \quad (1.18)$$

za podmínky $\varphi = (2n + 1)\pi$, kde $n \in \mathcal{Z}$.

Při změně fázového zpoždění na hodnoty podmínek pro dosáhnutí (1.17) a (1.18), bude teoretická hodnota vizibility

$$V = \frac{4A_1 A_2}{I_1 + I_2}, \quad (1.19)$$

kterou je možné vyjádřit pomocí parametrů děliče jako

$$V = \frac{\tau_1 \tau_2 \rho_1 \rho_2}{\tau_1^2 \rho_2^2 + \tau_2^2 \rho_1^2}, \quad (1.20)$$

1.4.1 Matematický popis ideálního dvoumódového děliče

Z předešlého popisu Machova-Zehnderova interferometru je zřejmé, že zásadní komponentou interferometru je dvoumódový dělič. Tento dělič je možné s výhodou popsat maticí 2×2 , která mapuje transformaci amplitudy na vstupu a výstupu

$$\begin{pmatrix} U_{1out} \\ U_{2out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau & \rho \\ -\rho & \tau \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{1in} \\ U_{2in} \end{pmatrix}. \quad (1.21)$$

Při platnosti vztahu (1.10) mohu provést substituci

$$\begin{aligned} \tau &= \cos \vartheta, \\ \rho &= \sin \vartheta \end{aligned} \quad (1.22)$$

a matici přepsat na tvar

$$\begin{pmatrix} U_{1out} \\ U_{2out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{1in} \\ U_{2in} \end{pmatrix}. \quad (1.23)$$

Zde s výhodou využiji parametr ϑ , jenž s pomocí vztahů (1.7), (1.11), (1.12) a (1.22) jednoduše vyjádřím

$$\vartheta = \arctan \sqrt{\frac{I_{1out}}{I_{2out}}}. \quad (1.24)$$

Hlavní výhodou této parametrizace dělicího poměru je jeho mapování na konečný interval od 0 do $\frac{\pi}{2}$.

Často je výhodnější použít intenzitní propustnost T a odrazivost R , které jsou s ekvivalentní amplitudovými veličinami svázány vztahy

$$\begin{aligned} T &= |\tau|^2 \\ R &= |\rho|^2. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Po dosazení do (1.10) obdržíme

$$T + R = 1 \quad (1.26)$$

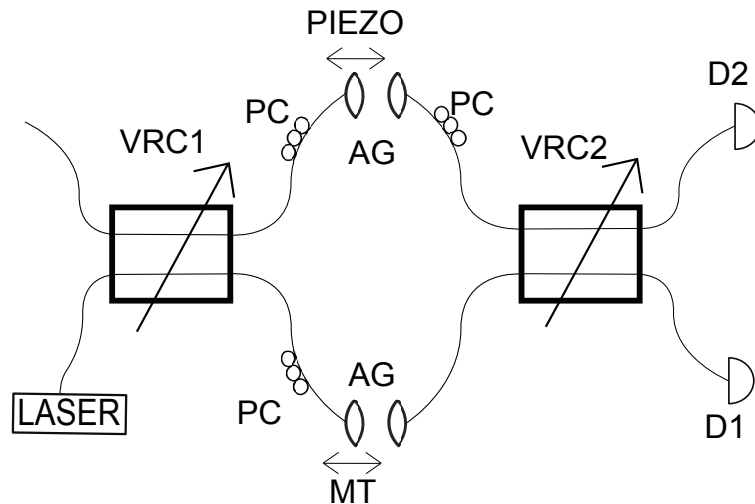
Pro popis děliče také v praxi zavádíme dělicí poměr jako poměr intenzitní propustnosti a odrazivosti $T : R$.

Kapitola 2

Sestavení interferometru

2.1 Experimentální uspořádání

Vláknový interferometr jsme se rozhodli realizovat dle schématu na obrázku 2.1 na přenosnou platformu $40 \times 60 \text{ cm}^2$, viz fotografie na obrázku 2.3. Použité komponenty jsou od firmy Thorlabs, Newport a Evanescent optics.



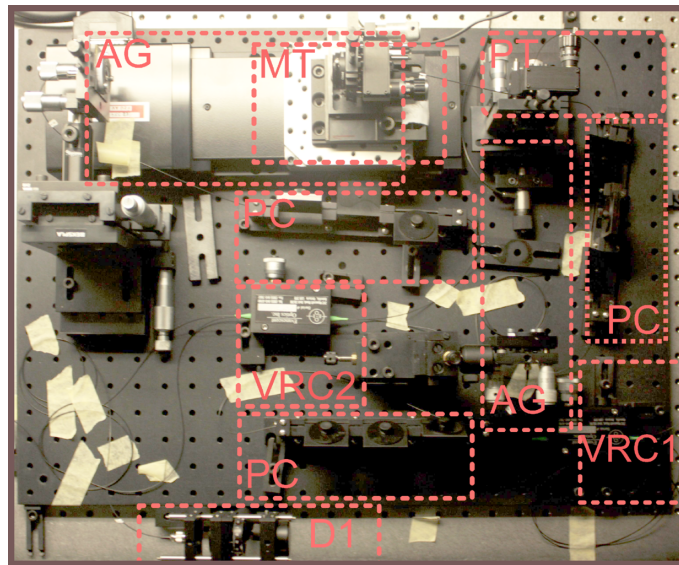
Obrázek 2.1: Schéma Machova-Zehnderova interferometru sestaveného z vláknových komponent; VRC: dělič s proměnným dělicím poměrem, MT: motorizovaný posuv, PIEZO: piezo posuv, PC: polarizační kontrolér, AG: vzduchová mezera, D: detektor

„Srdcem“ této implementace Machova-Zehnderova interferometru, jak je vidět na obrázku 2.2, jsou dva vláknové děliče VRC 905 s proměnným dělicím poměrem od firmy Evanescent optics osazené vlákny s cut-off vlnovou délkou¹ 600 nm. Dělicí poměr nastavujeme pomocí mikrošroubu umístěného na boku

¹Cut-off vlnová délka označuje nejmenší vlnovou délku, pro kterou vlákno vede pouze základní mód [22].

děliče, jehož stupnice nemá definované jednotky, pouze očíslované dílky. Vzhledem k hysterezi mikroposuvu není možné opakovat přesně nastavení pomocí této stupnice. Každou novou hodnotu dělicího poměru nastavujeme justáží mikrošroubu při současném měření výstupních intenzit.

Se záměrem zvýšit variabilitu uspořádání, především pak možnost umístění objemových komponent, jsme do obou ramen zavedli vzduchové mezery o délce přibližně 20 cm, které jsou opatřeny vyvazovací a navazovací optikou od firmy Thorlabs tvořenou kolimačními čočkami. V prvním rameni je použit motorizovaný mechanický posuv (M-)ILS 50 od firmy Newport, který umožňuje změnu velikosti vzduchové mezery v rozmezí 5 cm s nejmenším krokem 0,5 μm . Tento posuv je využíván k vyvážení délek ramen. Druhá vzduchová mezera je opatřena piezo posuvem od firmy Thorlabs, který je připojen ke zdroji napětí. Nastavením vhodného napětí jemně měníme délku ramene a tím i fázi vlny v tomto rameni. Ke spojitě změně délky ramene o minimálně interval jedné vlnové délky, potažmo k detekci minima a maxima interference, tento posuv napojíme na zdroj napětí s pilovitým průběhem v čase.



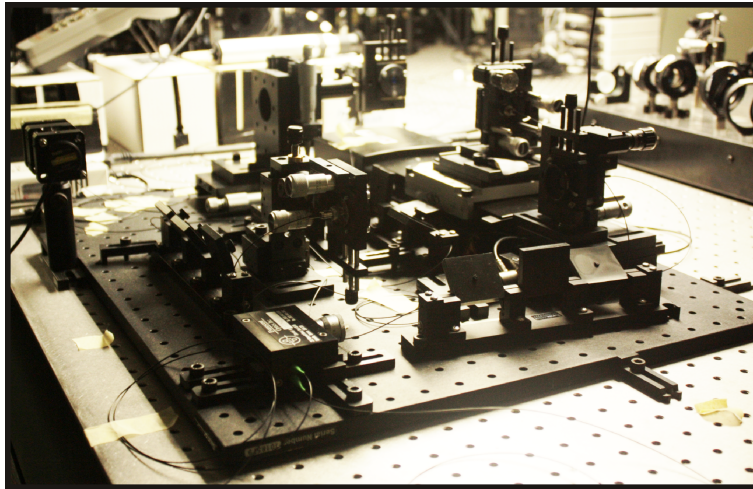
Obrázek 2.2: *Experimentální uspořádání v pohledu shora*

Jak je uvedeno v předešlé kapitole, interference je závislá na polarizaci, proto naše experimentální uspořádání obsahuje polarizační kontroléry od firmy Thorlabs, kterými regulujeme polarizaci v obou ramenech. Dva kontroléry jsou důležité pro naše měření, třetí je umístěn s ohledem na možnost umístění polarizačně závislých komponent do vzduchových mezer.

K základním experimentům, charakterizujícím tento interferometr, užíváme

jako zdroj laserovou diodu OZ Optics, model: FOSS-21-3S-4/125-685-S-1, o výkonu $1,329 \pm 0,005$ mW a o vlnové délce 685 nm. Pro měření intenzity na výstupu používáme měřič výkonu PM100 od firmy Thorlabs opatřený pin detektorem. Hlavní výhodou měřiče výkonu je možnost sběru dat s vyhodnocením základních statistických funkcí: maximum, minimum, střední hodnota a standardní odchylka.

Komponenty jsou spojeny jednomódovými optickými vlákny SM 600 od firmy Thorlabs s cut-off vlnovou délkou 600 nm.



Obrázek 2.3: *Experimentální uspořádání v perspektivě*

Experimentální uspořádání jsme na platformu rozmístili s důrazem na dobrý přístup k justážním prvkům, tedy polarizačním kontrolérům, děličům a navazovacím komponentám. Všechna vlákna jsou upevněna k platformě papírovou lepicí páskou, jejich pohyb by nežádoucím způsobem měnil polarizaci ve vláknech. Při pohybu motorizovaného posuvu pozorujeme deformaci vlákna, která má vliv na polarizaci. Tento problém řešíme opakováním justáže polarizace po vyvážení délek ramen. V posledním kroku jsme pak interferometr umístili do krabice, tak aby byly vnější vlivy co nejvíce eliminovány.

2.2 Softwarové vybavení

Pro vysázení této práce byl využit program $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ Live 2008 [23] s balíčkem $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$. Matematické operace a zpracování naměřených dat byly provedeny softwarem Octave 3.2.4 [24], grafy byly konstruovány programem GLE 4.2.4 [25]. Komunikaci s měřičem výkonu zajistil vlastní skript napsaný v programovacím jazyce Python [26].

Kapitola 3

Měření a výsledky

V této kapitole popíšeme provedená měření a jejich výsledky. Jako první jsme měřili charakteristiku děličů: závislost dělicího poměru na posuvu mikrošroubu a závislost dělicího poměru na polarizaci vstupní vlny. Ostatní měření se týkala interferometru jako celku: měření závislosti vizibility na dělicím poměru jednoho z děličů, měření stability fáze. Před popisem jednotlivých měření uvedeme základní úkony, které předchází většině provedených měření.

3.1 Justáž děliče

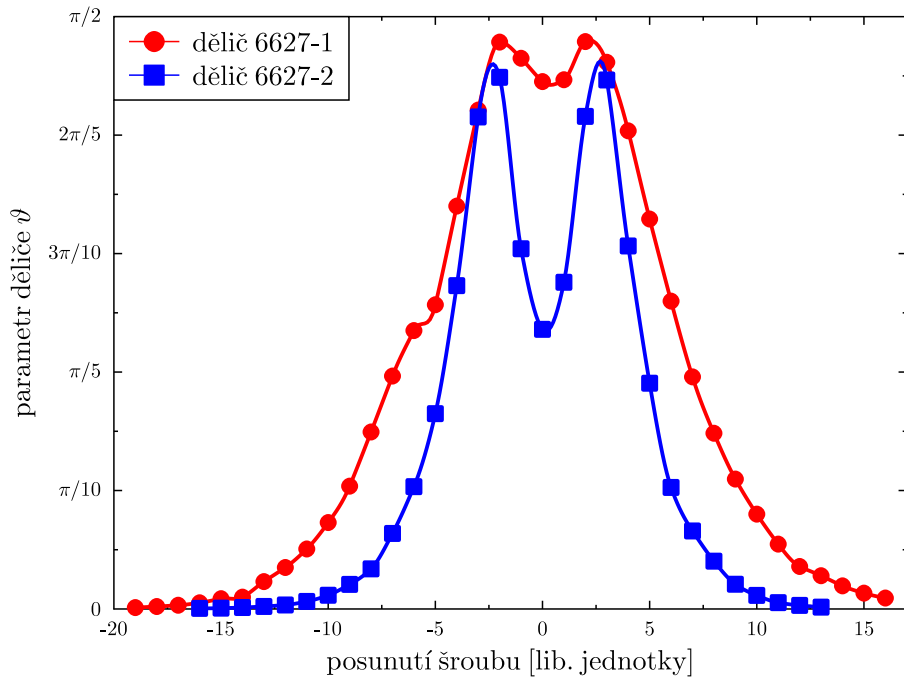
Dělicí poměr děliče zjistíme vydělením naměřených intenzit na obou výstupech děliče, přičemž všechen světelný signál vstupuje pouze jedním vstupem. Tyto intenzity můžeme dosadit do vztahu (1.24) a získat parametr děliče. Daný dělicí poměr nastavujeme posuvem mikrošroubu při současném měření výstupní intenzity z obou ramen.

3.2 Závislost dělicího poměru na posuvu mikrošroubu

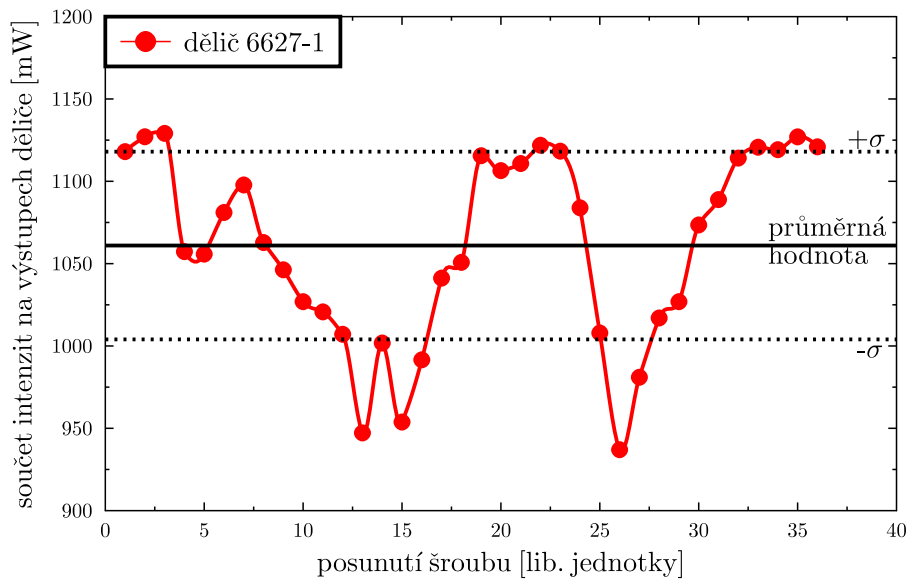
Měření závislosti dělicího poměru na posuvu mikrošroubu jsme uskutečnili za účelem ověření funkčnosti děliče.

Jako první jsme na jeden vstup děliče napojili laserovou diodu, posunuli mikrošroubem do krajní polohy, ve které jedním výstupem vychází všechen signál a druhým žádný. Poté jsme otáčeli mikrošroubem o jeden dílek ve směru, ve kterém nastane dělení signálu mezi obě výstupní ramena, a vždy provedli měření dělicího poměru pro danou polohu mikroposuvu. Tento proces probíhal do doby, než byl mikrošroub v druhé krajní poloze.

Z naměřených hodnot, viz obrázek 3.1, usuzujeme, že dělič dělí pro danou

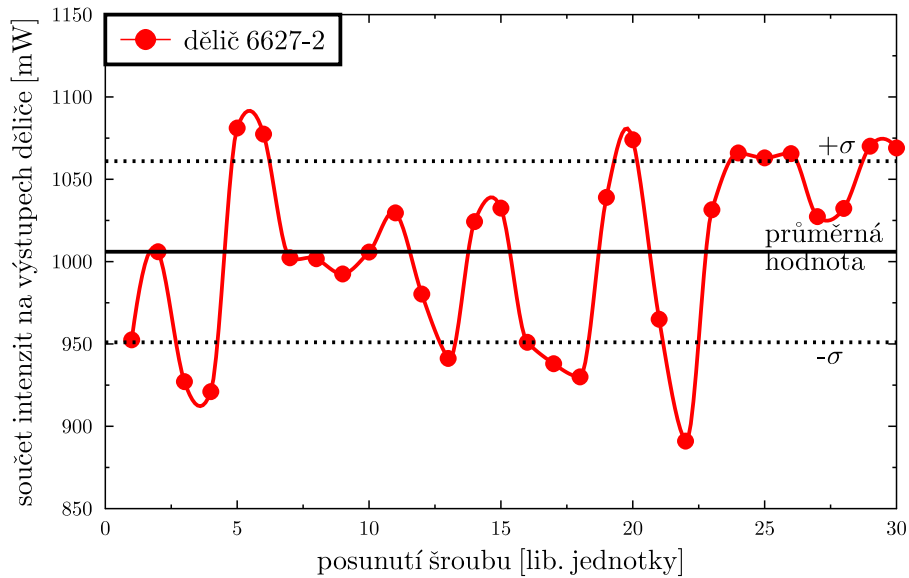


Obrázek 3.1: Závislost dělicího poměru na posunutí mikrošroubu



Obrázek 3.2: Závislost součtu intenzit na výstupech 1. dělice na posunutí mikrošroubu

vlnovou délkou 685 nm spojitě v rozsahu dělicího parametru $(0; \frac{\pi}{2})$ a přibližně v souladu s technickou specifikací dodanou výrobcem, který také uvádí dvě maxima.



Obrázek 3.3: Závislost součtu intenzit na výstupech 2. děliče na posunutí mikrošroubu

Závislost součtu intenzit na obou výstupech na posunutí mikrošroubu, viz obrázky 3.2, 3.3, charakterizuje ztráty děliče. Oba použité děliče vyvazují fluktuace celkového výstupního výkonu v rozmezí přibližně 5% v závislosti na nastavení dělicího poměru.

3.3 Závislost dělicího poměru na polarizaci signálu

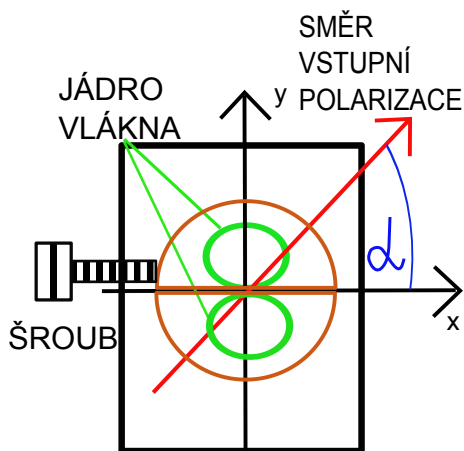
Motivace

Vnitřní konstrukce děliče, viz obrázek 3.4, definuje dvě kolmé osy symetrie. Při vstupu lineárně polarizované vlny, která svírá s osou x úhel α , popřípadě elipticky polarizované vlny, jejíž hlavní osa svírá s osou x úhel α , očekáváme závislost dělicího poměru na funkci $\cos \alpha$. Důvodem je nekruhová symetrie vnitřního uspořádání děliče.

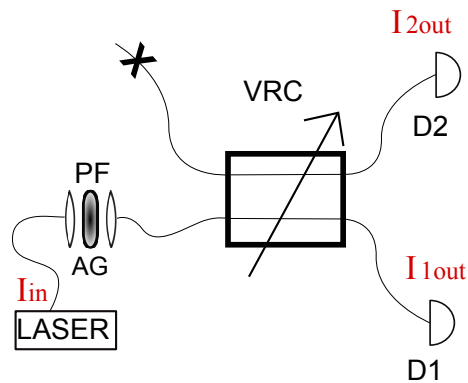
Měření

Měření jsme provedli pouze na jednom děliči, u druhého očekáváme podobné chování.

Mezi laserovou diodu a dělič vložíme vzduchovou mezeru, do které umístíme optický polarizační filtr v montáži s úhlovou stupnicí s nejmenším dílkem 1° , viz obrázek 3.5. Na měřeném děliči nastavíme fixní dělicí poměr, metodou popsá-



Obrázek 3.4: Schéma vnitřní konstrukce používaného dvoumódového děliče

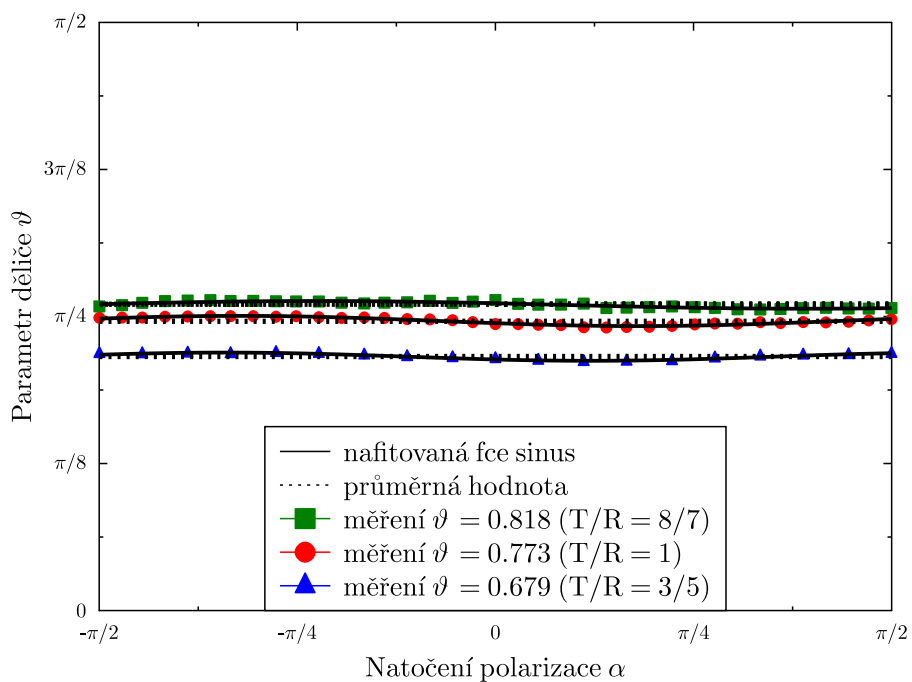


Obrázek 3.5: Schéma experimentálního uspořádání pro měření závislosti dělicího poměru na polarizaci vstupní vlny, AG: vzduchová mezera opatřená kolimačními čočkami, PF: polarizační filtr, VRC: dělič svazku, $D_{1,2}$: detektory

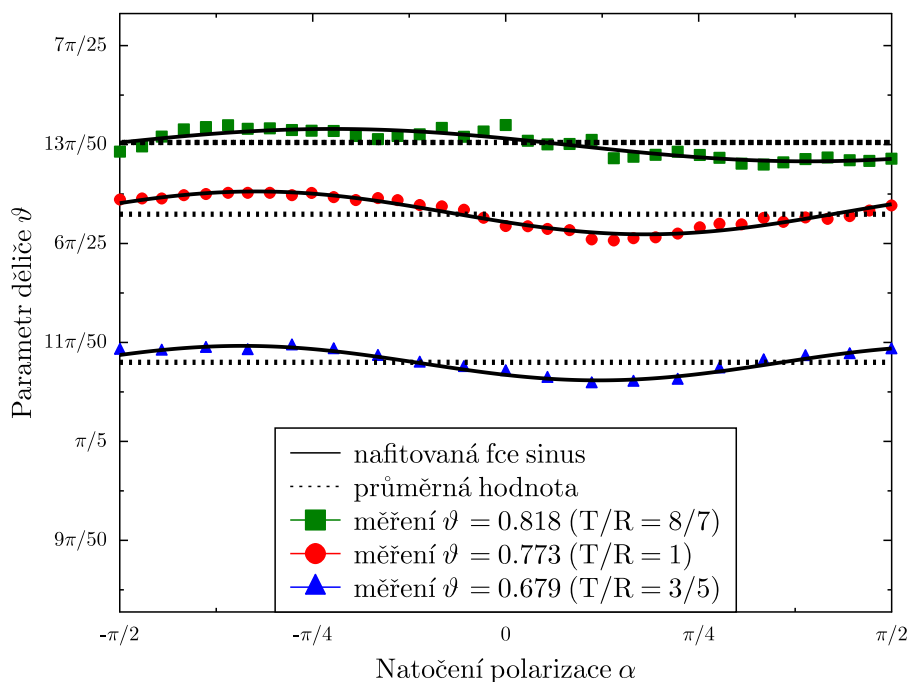
nou v úvodu kapitoly, a polarizačním filtrem měníme polarizaci vlny vstupující do děliče. Polarizaci otáčíme vždy o 5° , detektorem na prvním výstupu snímáme intenzitu I_{1out} a poté na druhém výstupu intenzitu I_{2out} . Ze získaných hodnot pomocí vztahu 1.24 spočítáme parametr děliče ϑ , tyto hodnoty závislé na natočení polarizačního filtru vyneseme do grafu na obrázku 3.6.

Pro speciální případ kruhové polarizace by byla změna dělicího poměru nepatrná, proto jsme toto měření provedli třikrát pro stejný dělicí poměr s různě deformovanými vlákny vstupu děliče, tak aby pravděpodobnost výskytu kruhové polarizace v děliči byla minimální. Výsledky všech měření nebyly významně rozdílné.

Z výsledků měření uvažujeme, že závislost dělicího poměru na změně polarizace vstupní vlny může být považována za konstantní. Důležitost tohoto závěru je především pro budoucí práci s touto implementací Machova-Zehnderova interferometru. Detailnější zobrazení na obrázku 3.7 poukazuje na správnost našich úvah o harmonické závislosti dělicího poměru děliče na změně polarizace vstupní vlny. Maximální odchylka daná změnou vstupní polarizace je minimální, pouze 2%. Fit naměřených hodnot byl proveden funkcí sin pomocí metody nejmenších čtverců.



Obrázek 3.6: Závislost dělicího poměru na polarizaci vstupního signálu



Obrázek 3.7: Závislost dělicího poměru na polarizaci vstupního signálu – menší rozsah

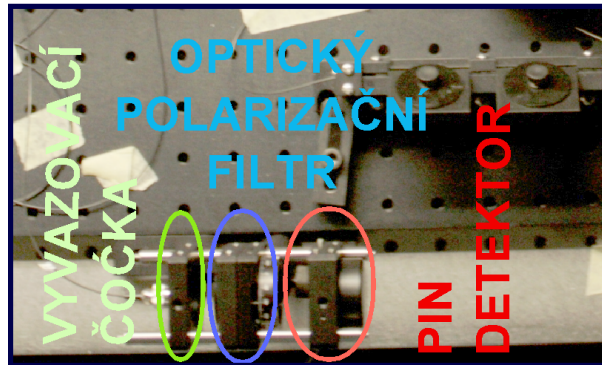
3.4 Justáž interferometru

Před každým měřením je třeba provést na experimentálním uspořádání několika stupňovou justáž vzduchových mezer, polarizace světelných vln v obou ramenech a vyvážení délek ramen.

Justáž vzduchových mezer, tedy optimalizace vyvážání vlny do volného prostoru a opětovného navázání zpět do vlákna, patří k časově nejnáročnějším úkonům. U této justáže využíváme náklonů navazovací a vyvazovací optiky a možnost posuvu ve vertikální a horizontální ose jedné z navazovacích čoček. V praxi využíváme buď justáž náklonů obou čoček, nebo kombinovanou justáž vertikálního a horizontálního posuvu a náklonů (tzv. walkování). S tímto postupem vystačíme u vzduchové mezery s piezo posuvem, jelikož zavádí změnu dráhy pouze v rozmezí μm . U vzduchové mezery s motorizovaným posuvem chceme zajistit, aby byla vlna shodně navázána pro každou polohu posuvu, tedy musí být osy obou čoček rovnoběžné se směrem posuvu. Proto k iterativní optimalizaci náklonů a posuvu v horizontální a vertikální ose přidáváme horizontální posuv vyvazovací čočky v ose mezery a to tak, že provádíme justáž navázání pro krajní polohy posuvu. Pokud se justáž nedaří, můžeme zaměnit vstup za výstup a provádět justáž druhým směrem. Jelikož používaná jednomódová vlákna mají malé jádro, s výhodou používáme k hrubé justáži multimódové vlákno, které má podstatně větší jádro [27]. Finální justáž však musíme provádět s používanými jednomódovými vlákny. Typicky do jednomódového vlákna navazujeme 80% intenzity z vyvážaného signálu.

Aby bylo dosaženo maximální míry interference, je nutné aby interferovaly stejně polarizované vlny. Proto provádíme justáž polarizace pomocí polarizačních kontrolérů. V našem případě využíváme pouze dva kontroléry, v každém rameni po jednom. Pro tuto justáž jsme mezi detektor a jeden výstup interferometru umístili optický polarizační filtr s možností otočení s nejmenším krokem 1° , viz obrázek 3.8. Postupně jsme s využitím polarizačních kontrolérů a polarizačního filtru sladili polarizaci vycházející z obou ramen.

V obou ramenech interferometru jsme použili přibližně stejně dlouhá vlákna a do obou ramen jsme umístili přibližně stejně široké vzduchové mezery. Justáž vyvážení délek ramen provádíme za pomoci motorizovaného posuvu s přesností na $1 \mu\text{m}$. Oba děliče svazku nastavíme na dělení 1:1. Piezo posuv připojíme na zdroj pilovitého napětí, tak aby se vzduchová mezera periodicky zvětšovala a zmenšovala v rozmezí alespoň 1 vlnové délky vstupujícího světla. Jedním vstupem interferometru přivádíme světelný signál z laserové diody, na výstupu měříme maximum a minimum intenzity a pomocí vztahu 1.16 získáme vizibi-



Obrázek 3.8: *Speciální uspořádání před detektorem*

litu. Při tomto nastavení dělicích poměrů by měla být vizibilita jednotková, dle vztahu 1.19. Opakovaným proskenováním celé délky vzduchové mezery s motorizovaným posuvem hledáme maximální vizibilitu. První sken je s hrubším trasováním, tak abychom našli přibližnou polohu. Další skeny jsou pak jemnější, přičemž byl využit krok posuvu $1\ \mu\text{m}$.

Kvůli nedokonalosti experimentálního uspořádání jsme však nedosáhli jednotkové vizibility. Vizibilita bude i při přesném vyvážení ramen nižší o několik tisícín.

Justáž interferometru musela být provedena před každým měřením na interferometru a typicky trvala 2 až 3 hodiny. Bezprostředně po justáži dosahujeme vizibility interferometru $V = 0,995$ a to bez odečtení pozadí.

3.5 Závislost vizibility na dělicím poměru $T_2 : R_2$

Měření při $T_1 = 0,5$

Pro ověření správné funkce interferometru jsme provedli měření vizibility v závislosti na změně propustnosti druhého děliče. Dělicí poměr prvního děliče zůstal fixní.

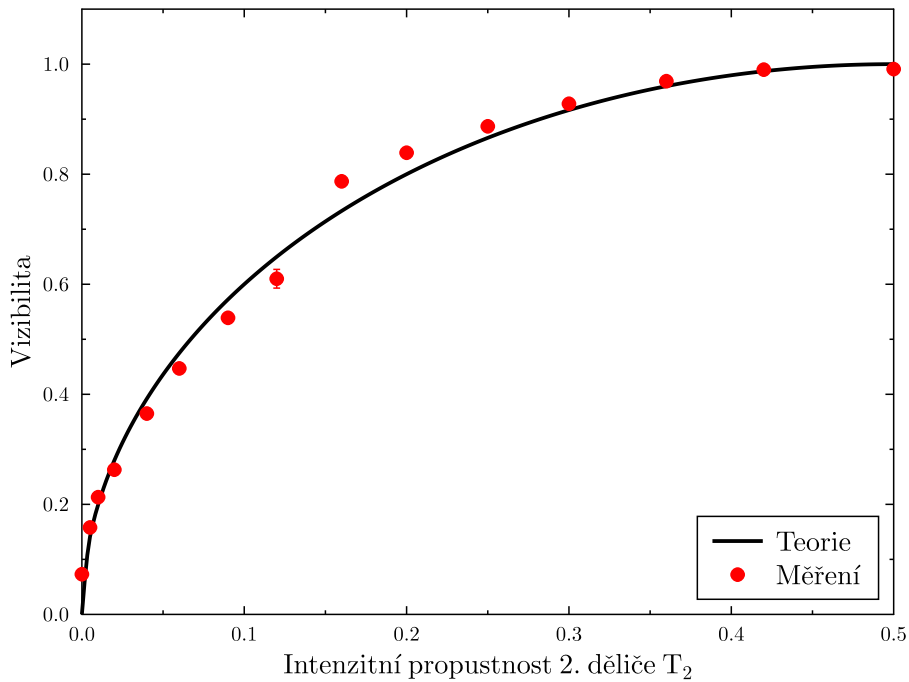
Rozhodli jsme se provést měření vizibility pro $T_1 = 0,5$, což je typické nastavení. Po justáži experimentálního uspořádání jsme nastavili první dělicí poměr, piezo posuv připojili na zdroj napětí s pilovitým průběhem v čase v rozmezí $0\text{--}50\ \text{V}$, díky čemuž se bude posuv pohybovat minimálně v rozmezí jedné vlnové délky. Na druhém děliči jsme nastavili dělicí poměr, počkali přibližně $20\ \text{s}$, tak aby piezo posuv několikrát proskenoval vlnovou délku a měřič výkonu měl čas zadetkovat maximum i minimum interference. Měřili jsme intenzitu vlny pouze na jednom výstupu interferometru.

Měření jsme provedli pouze na intervalu $T_2 \in \langle 0; 0,5 \rangle$, viz obrázek 3.9, a porovnali s teoretickým modelem. Hodnoty na intervalu $T_2 \in \langle 0,5; 1 \rangle$ jsou symetrické. Chyba měření v obou osách byla až na jeden případ menší než zobrazovaný bod. Odchylku v okolí $T_2 \in \langle 0,1; 0,2 \rangle$ přiřazujeme rozposunutí dělicího poměru T_1 .

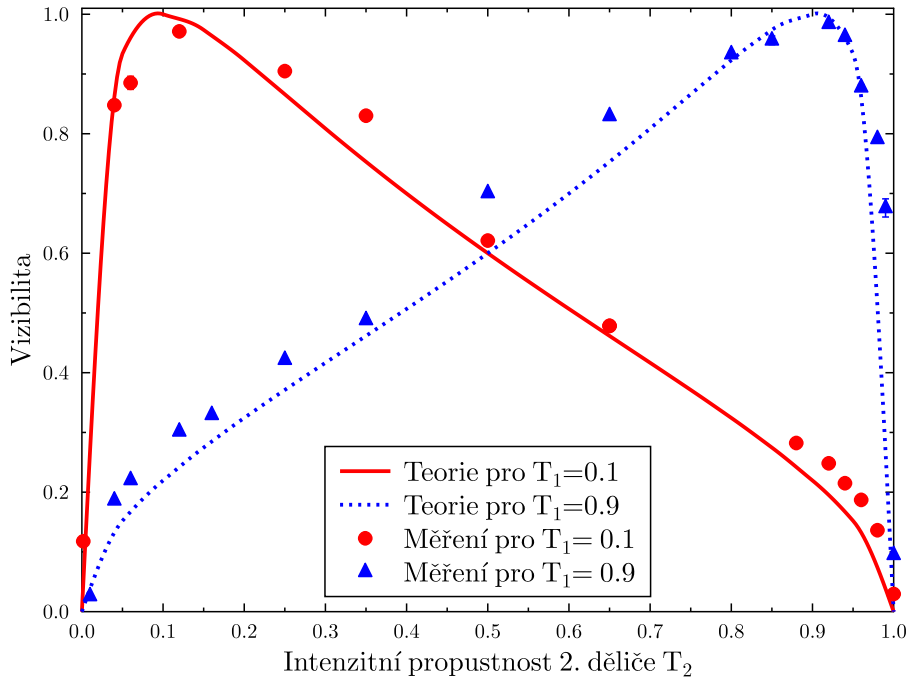
Měření pro $T_1 = 0,1$ a $T_1 = 0,9$

Dalším krokem k ověření funkčnosti interferometru bylo měření s asymetrickým dělicím poměrem. Měření probíhalo stejně jako měření minulé. Vizibilitu pro propustnost $T_1 = 0,1$ jsme určovali z jednoho výstupu, vizibilitu pro propustnost $T_1 = 0,9$ z druhého.

Výsledky jsou opět uspokojivé, chyba, která se objevila byla systematická a přisuzujeme ji nestabilitě vzduchových mezer, ztrátám v ramenech interferometru a rozposunutí prvního dělicího poměru.



Obrázek 3.9: Měření vizibility v závislosti na změně propustnosti T_2 při $T_1 = 0,5$



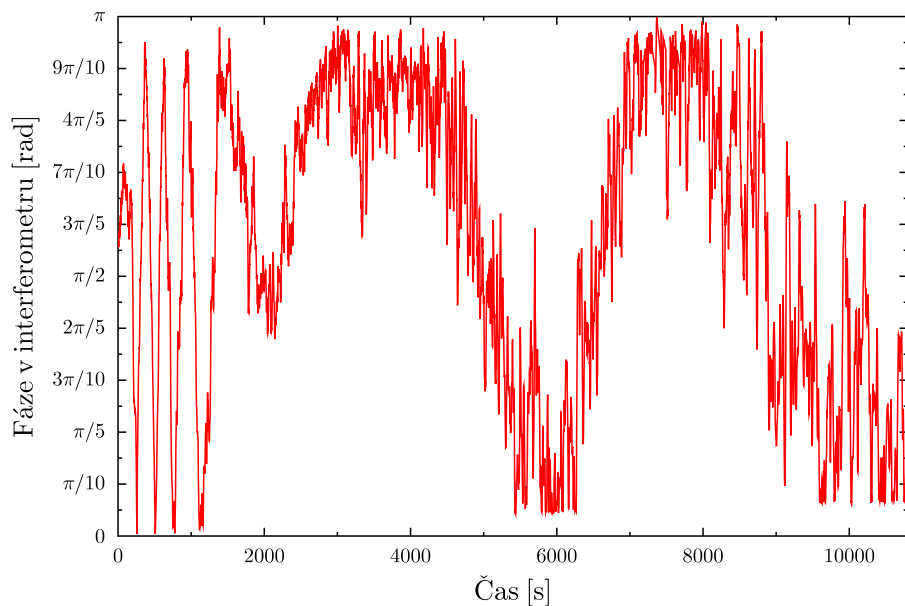
Obrázek 3.10: Měření vizibility v závislosti na změně propustnosti T_2 pro $T_1 = 0,1$ a $T_1 = 0,9$

3.6 Stabilita fáze interferometru

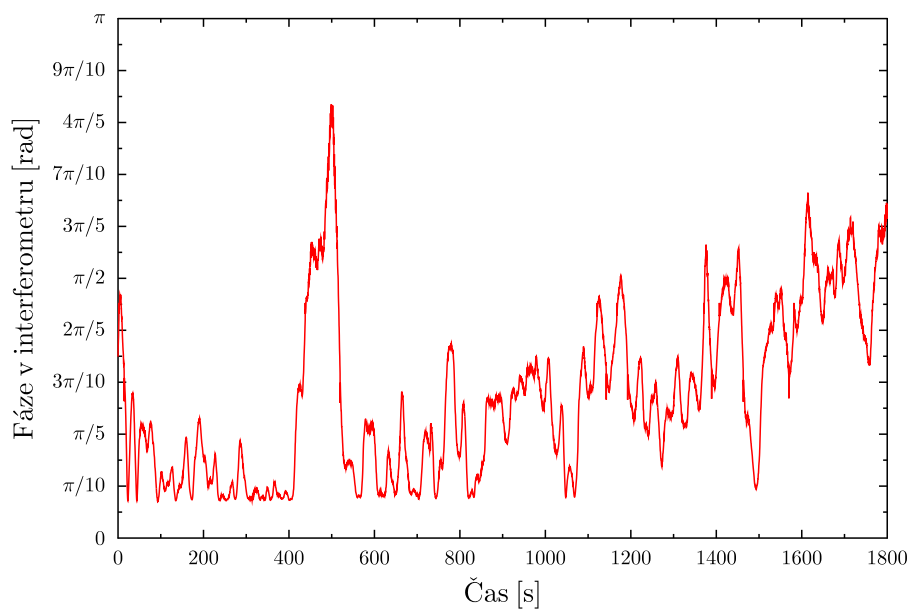
Stabilita interferometru je důležitou veličinou pro jeho charakterizaci. Popisuje časovou změnu fáze mezi rameny, která je způsobena fluktuacemi jejich optických délek. V našem experimentálním uspořádání jsou dominantními zdroji nestability teplotní fluktuace indexu lomu ve vláknech. Po již zmiňované několika stupňové justáži jsme pomocí pythonovského skriptu sbírali do počítače data z měřiče výkonu připojeného na konec jednoho z ramen interferometru. Se změnou vzájemné fáze mezi rameny se měnila také intenzita detekovaná na výstupu.

První měření bylo prováděno po dobu 3 hodin s frekvencí 1 měření intenzity za 2 s, viz obrázek 3.11. Na zmíněném obrázku je názorně ilustrováno, jak se během prvních 1600 s interferometr uklidňoval, jeho komponenty si tzv. „sedaly“. Druhé měření, viz obrázek 3.12, následovalo hned v zápětí, trvalo 0,5 hodiny a během 1 s bylo provedeno 5 měření intenzity, což je maximální možná rychlost při komunikaci měřičem výkonu a počítače. Z těchto dat byl také sestaven histogram na obrázku 3.13 a 3.14, jenž demonstruje schopnost interferometru udržet určitou fázi s danou tolerancí. Histogramy vyjadřují četnosti změn fáze ve vybraných intervalech tolerance.

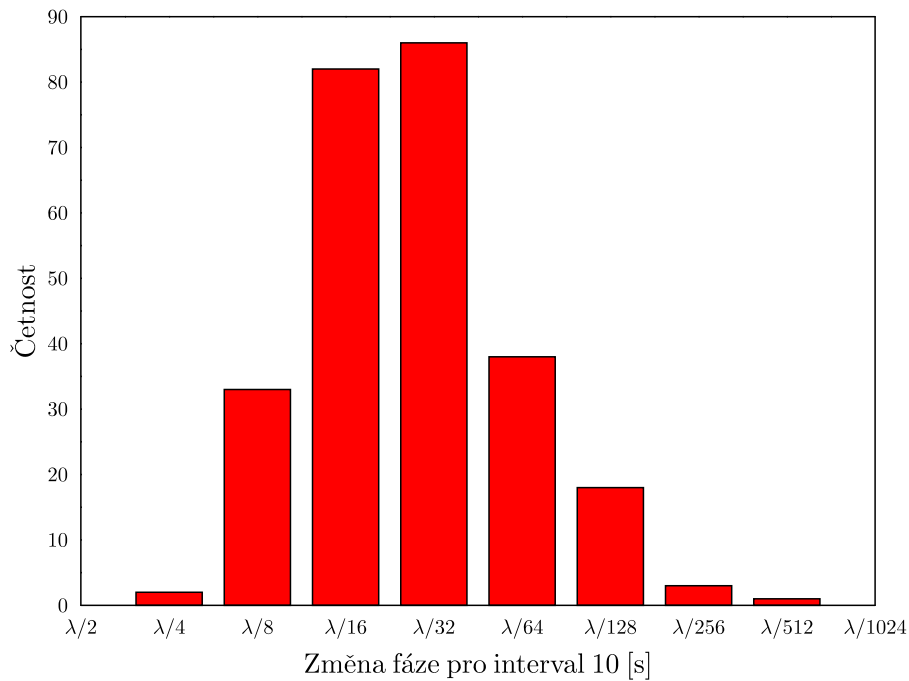
Z výsledků histogramů na obrázku 3.13 a 3.14 víme, že po dobu 10 sekund se fáze změní s nezanedbatelnou četností nejhůře o $\frac{\lambda}{8}$ a po dobu 1 sekundy nejhůře o $\frac{\lambda}{64}$.



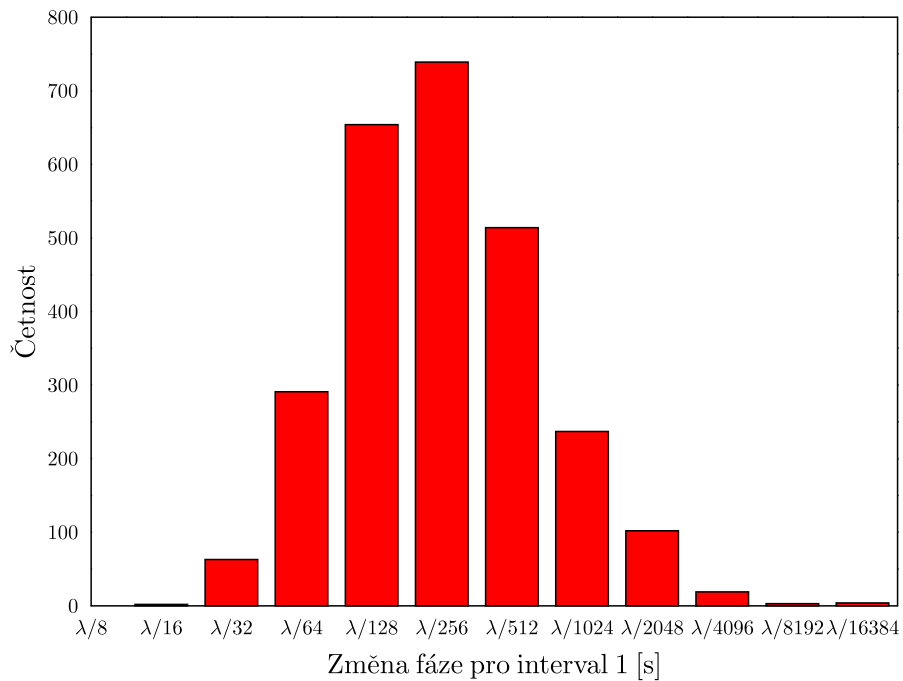
Obrázek 3.11: *Stabilita fáze měřená po dobu tří hodin*



Obrázek 3.12: *Stabilita fáze měřená po dobu půl hodiny*



Obrázek 3.13: Histogram udržení fáze po dobu 10 s, data z měření na obrázku 3.12, v daném sloupci je četnost změny fáze v intervalu od hodnoty příslušné popisky až do další hodnoty v pravo, která náleží dalšímu sloupci



Obrázek 3.14: Histogram udržení fáze po dobu 1 s, data z měření na obrázku 3.12, v daném sloupci je četnost změny fáze v intervalu od hodnoty příslušné popisky až do další hodnoty v pravo, která náleží dalšímu sloupci

Kapitola 4

Závěr

Tato bakalářská práce se věnuje sestavení vláknového Machova-Zehnderova interferometru s děliči s proměnnými dělicími poměry.

V úvodní kapitole je popsána interference za použití aparátu vlnové optiky a dále je provedena rešerše používaných interferometrů. Konec této kapitoly je věnován matematickému popisu funkce sestavovaného interferometru a jeho děličů.

Ve druhé kapitole je popsáno samotné sestavení experimentálního uspořádání, detailně pak použité komponenty a jejich vlastnosti. Na konci kapitoly je uveden využitý software. Třetí kapitola se zabývá popisem provedených měření s cílem ověřit fungování děličů a interferometru. Na děličích byla měřena jejich schopnost měnit dělicí poměr a závislost dělicího poměru na polarizaci vstupního signálu. Na experimentálním uspořádání interferometru byla měřena závislost vizibility na propustnosti jednoho z děličů a vyhodnocena stabilita interferometru.

Výsledkem této práce je funkční vláknový Machův-Zehnderův interferometr, který nalezne díky vlastnostem, které jsou popsány v této práci, uplatnění v laboratorních kvantově optických experimentech.

Conclusions

This bachelor thesis focuses on the construction of fibre-optical Mach-Zehnder interferometer using beam splitters with variable splitting ratios.

The first chapter describes the phenomenon of interference while using wave optics. Moreover, there is a list of the most common interferometers in the first chapter. The end of the chapter focuses on the mathematical description of functions of the constructed interferometer and its beam splitters.

The construction of the interferometer, its components and its used software are described in detail in the second chapter. The third chapter includes all the performed measurements. The purpose of these measurements is to check the correct functioning of the interferometer. The measurements on beam splitters alone include test for capability to change the splitting ratio and the dependence of the splitting ratio on polarization of input signal. The measurements on the interferometer include the dependence of the visibility on the splitting ratio of one of the beam splitters. Finally, the last measurement verifies the stability of the interferometer.

The output of this thesis is a correctly working fibre-optical Mach-Zehnder interferometer. The properties of the interferometer described in this thesis ensure its usefulness in quantum optical experiments in our laboratory.

Literatura

- [1] *Komenského slovník naučný*, svazek V, nakladatelství a vydavatelství Komenského slovníku naučného, Praha (1938)
- [2] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Základy Fotoniky*, český překlad Matfyzpress, UK Praha (1995)
- [3] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, Cambridge, England (2003)
- [4] <http://www.scribd.com/doc/16117537/Interference-of-Light-Its-Applications-Interferometry> (10.3.2012)
- [5] M. Čechová, *Elektromagnetické vlny*, vydavatelství UP Olomouc, (1989)
- [6] G. Rieke, *Detection of light*, Cambridge University Press, Cambridge, England, (2003)
- [7] A. Michelson, E. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science **34**, 333–345 (1887)
- [8] A. Michelson, F. G. Pease, *Measurement of the diameter of α Orionis with the interferometer*, Astrophys. J. **53**, 249–259 (1921)
- [9] C. Fabry, A. Perot, *Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air*, Ann. Chim. Phys. **12**, 459–501 (1897)
- [10] M. Hercher, *The Spherical Mirror Fabry-Perot Interferometer*, Appl. Optics **7**, 951–966 (1968)
- [11] G. Sagnac, *On the proof of the reality of the luminiferous ether by the experiment with a rotating interferometer*, Comptes Rendus **157**, 1410–1413 (1913)

- [12] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA (2006)
- [13] R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, *A Test of a New Type of Stellar Interferometer on Sirius*, Nature **178** (4541), 1046–1048 (1956)
- [14] L. Zehnder, *Ein neuer Interferenzrefraktor*, Zeitschrift für Instrumentenkunde **11**, 275–285 (1891)
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment (10. 3. 2012)
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect (10. 3. 2012)
- [17] A. Černocho, *Optické přepínače pro kvantové komunikace*, diplomová práce, UP v Olomouci (2002)
- [18] R. Machulka, *Konstrukce vláknového interferometru s použitím nových moderních komponent*, diplomová práce, UP v Olomouci (2008)
- [19] http://agamemnon.cord.org/cm/leot/course10_Mod07/Module10-7.htm (16.2.2012)
- [20] K. Lemr, J. Fiurášek, *Preparation of entangled states of two photons in several spatial modes*, Phys. Rev. A **77**, 023802 (2008)
- [21] M. Nielsen, I. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press (2002)
- [22] www.molexpn.cz/reseni/pdfs/scsgloss.doc (31.3.2012)
- [23] <http://www.tug.org/texlive/> (31. 3. 2012)
- [24] <http://www.gnu.org/software/octave/> (31. 3. 2012)
- [25] <http://www.gle-graphics.org/> (31. 3. 2012)
- [26] <http://www.python.org/> (31. 3. 2012)
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-mode_optical_fiber (31. 3. 2012)