

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ANALÝZA PROFILU POVRCHŮ POMOCÍ INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

SURFACE ANALYSIS USING LOW-COHERENCE INTERFEROMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ PIKÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK BUCHTA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Pikálek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence

v anglickém jazyce:

Surface analysis using low-coherence interferometry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci řešení bakalářské práce bude vypracován přehled základních principů interferometrických měření a laserových interferometrů. Student provede návrh a realizaci experimentální sestavy pro měření profilu povrchů, kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. Dále student provede experimentální měření na určeném vzorku, výsledky měření vyhodnotí a srovná s měřením referenčním (např. AFM mikroskop).

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se se základními principy interferometrických měření a typy laserových interferometrů, popis principu laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence.
2. Návrh a realizace experimentální sestavy pro optické měření profilu povrchů, kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence.
3. Experimentální měření, srovnání výsledků s měřením referenčním (např. AFM mikroskop).

Seznam odborné literatury:

[1] Číp, Ondřej ; Buchta, Zdeněk ; Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie, http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf, 2011

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 16.11.2013

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá interferometrií nízké koherence, zejména jejím využitím v kombinaci s laserovou interferometrií pro optickou analýzu profilu povrchů. Uvádí principy laserové interferometrie se zaměřením na přesné měření délek a také principy interferometrie nízké koherence. Detailně popisuje metody detekce středu interferenčního proužku v interferometrii nízké koherence a jejich implementaci do prostředí MATLAB. Na základě měření a numerické simulace srovnává přesnost popsaných metod při detekci profilu povrchů, odolnost vůči disperzi a výpočetní náročnost a vybírá nejvhodnější metodu pro použití při analýze profilu povrchů. Popisuje také návrh a realizaci experimentální sestavy pro optické měření profilu povrchů kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence, měření provedená na této sestavě a zpracování naměřených dat. Pro naměřené hodnoty jsou stanoveny nejistoty a hodnoty jsou srovnány s referenčním měřením.

Summary

This thesis deals with low-coherence interferometry, laser interferometry and its combination intended to be used for contactless surface analysis. It outlines theoretical background of laser interferometry and low-coherence interferometry and describes in detail interference fringe center detection techniques used in low-coherence interferometry and their implementation into MATLAB environment. All these techniques theoretically described were analyzed to evaluate their measurement accuracy, resistance to optical dispersion and computational complexity in order to choose the most appropriate technique to be involved into the experiment. Furthermore, the thesis describes design of an experimental setup for optical surface analysis combining laser interferometry and low-coherence interferometry. There are presented experimental results and its comparison with the reference measurement. Overall measurement uncertainty is calculated and discussed too.

Klíčová slova

laserová interferometrie, interferometrie nízké koherence, analýza profilu povrchů, metody detekce středu interferenčního proužku

Keywords

laser interferometry, low-coherence interferometry, surface analysis, fringe center detection techniques

PIKÁLEK, Tomáš. *Analýza profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence*. Brno, 2014. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk BUCHTA.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Analýza profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Buchty, Ph.D. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Tomáš Pikálek

Děkuji svému vedoucímu Ing. Zdeňku Buchtovi, Ph.D. za svědomité vedení mé bakalářské práce a také Ing. Tomáši Fořtovi, Ph.D. za provedení referenčních měření.

Tomáš Pikálek

Obsah

Úvod	1
1. Interference	3
1.1. Interference koherentních vln	3
1.2. Koherenční délka	4
2. Laserová interferometrie	7
2.1. Základní typy laserových interferometrů	7
2.1.1. Michelsonův interferometr	7
2.1.2. Machův–Zehnderův interferometr	8
2.1.3. Fabryův–Perotův interferometr	8
2.2. Měření vzdálenosti pomocí interferometru	9
2.2.1. Homodynní detekce	9
2.2.2. Heterodynní detekce	9
2.2.3. Hilbertova transformace	11
2.3. Index lomu vzduchu	12
2.3.1. Přímé metody měření indexu lomu vzduchu	12
2.3.2. Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu	13
3. Interferometrie nízké koherence	15
3.1. Michelsonův interferometr ve WLI	15
3.2. Analýza profilu povrchů pomocí WLI	18
3.3. Detekce vyváženého stavu Michelsonova interferometru	22
3.3.1. Maximum signálu	23
3.3.2. Vážený průměr poloh maxim	24
3.3.3. Korelační metoda	26
3.3.4. Fitování proužku	29
3.3.5. Analýza ve frekvenční oblasti	30
3.3.6. Maximum obálky	32
3.4. Detekce středu proužku v prostředí MATLAB	33
3.5. Srovnání metod detekce středu proužku	34
3.5.1. Výpočetní náročnost metod	34
3.5.2. Přesnost detekce rovinného zrcadla	36
3.5.3. Odolnost metod vůči disperzi	37
3.6. Výběr metody detekce středu proužku	43

4. Návrh a realizace sestavy pro měření profilu povrchů	45
4.1. Návrh sestavy	45
4.1.1. Návrh zdroje světla pro interferometr	45
4.1.2. Návrh interferometru	47
4.1.3. Návrh detekční části	47
4.2. Realizace sestavy	48
4.2.1. Realizace optické části	48
4.2.2. Měření indexu lomu vzduchu	51
4.3. Omezení realizované sestavy	51
5. Měření profilu povrchů a srovnání s referenčním měřením	53
5.1. Měření na realizované sestavě	53
5.2. Zpracování naměřených dat	54
5.3. Měření hloubky leptané struktury	54
5.4. Nejistoty měření	59
5.4.1. Nejistota určení středu interferenčního proužku	59
5.4.2. Nejistota indexu lomu vzduchu	59
5.4.3. Nejistota měření polohy měřicího zrcadla	59
5.4.4. Rovinnost referenčního povrchu	61
5.4.5. Celková nejistota měření	63
5.5. Srovnání s referenčním měřením	64
5.5.1. Konfokální mikroskop	64
5.5.2. Profilometr	64
Závěr	67
Literatura	69
Seznam použitých zkratk a symbolů	71
Seznam příloh	73

Úvod

Jevy způsobené vlnovými vlastnostmi světla můžeme pozorovat všude kolem nás. Příkladem mohou být barevné proužky na mýdlové bublině, olejové skvrně nebo křídlech hmyzu vznikající v důsledku interference bílého světla na tenké vrstvě [1, s. 959]. Obrazce vznikající při průchodu světla jemnými síťovinami (například záclonami) a barevné pruhy viditelné na CD, DVD apod. pozorujeme díky difrakci [1, s. 978]. Quételetovy kruhy na vodní hladině nebo špinavé okenní tabuli pak vznikají v důsledku rozptylu světla na prachových částicích [2]. Vlnových vlastností světla však lze využít i k přesnému měření. Obor, který využívá interference dvou či více světelných vln pro měření délek, tloušťky tenkých vrstev, rovinnosti povrchů, indexu lomu a dalších veličin, je interferometrie.

Laserová interferometrie využívá zdroje s velkou koherenční délkou a známou stabilní frekvencí (lasery). Díky tomu je tato metoda vhodná například pro přesné měření délek, měření rovinnosti lesklých ploch či měření indexu lomu transparentních prostředí. Interferometrie nízké koherence je metoda využívající naopak zdroje s krátkou koherenční délkou (širokospektrální zdroje, např. bílého světla), díky čemuž je vhodná například pro měření profilu povrchů, tloušťky tenkých vrstev nebo drsnosti povrchů. [3]

Tato práce se zabývá využitím interferometrie nízké koherence v kombinaci s laserovou interferometrií pro optické měření profilu povrchů. Práce je rozdělena do pěti kapitol.

První kapitola práce je věnována obecně interferenci, jsou v ní zavedeny základní pojmy používané ve zbytku práce.

Druhá kapitola popisuje laserovou interferometrii. Jsou popsány některé typy laserových interferometrů, metody využití Michelsonova interferometru k přesnému měření délek a je také popsán vliv indexu lomu vzduchu na interferometrická měření včetně metod stanovení jeho hodnoty.

Třetí kapitola se zabývá interferometrií nízké koherence, zejména využitím Michelsonova interferometru pro měření profilu povrchů. Popisuje různé metody detekce vyváženého stavu Michelsonova interferometru, tedy středu interferenčního proužku, a srovnává je na základě měření a numerické simulace. Na závěr kapitoly je proveden výběr nejvhodnější metody pro použití při vyhodnocování profilu povrchů.

Ve čtvrté kapitole je popsán návrh a realizace experimentální sestavy pro optické měření profilu povrchů kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence, která využívá jevy a metody popsané v první polovině práce.

Pátá kapitola práce popisuje měření na realizované sestavě, zpracování naměřených dat pomocí metod popsaných v první polovině práce, stanovení nejistot provedených měření a srovnání naměřených hodnot s referenčním měřením.

ÚVOD

1. Interference

Tato kapitola se zabývá interferencí, jsou zde zavedeny základní pojmy jako např. koherenční délka, používané v dalších kapitolách práce.

Optickou vlnu popisujeme pomocí reálné funkce $u(\mathbf{r}, t)$ polohy \mathbf{r} a času t nazvané vlnová funkce, vyhovující vlnové rovnici

$$\Delta u(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla v prostředí, ve kterém se vlna šíří. Intenzita vlny v bodě \mathbf{r} a čase t je

$$I(\mathbf{r}, t) = 2 \langle u^2(\mathbf{r}, t) \rangle, \quad (1.2)$$

kde střední hodnota je přes časový interval mnohem delší než perioda vlny, ale mnohem kratší než doba jevů, které chceme pozorovat. [4, s. 43]

Monochromatickou vlnu můžeme v každém bodě \mathbf{r} a čase t popsat pomocí komplexní vlnové funkce

$$U(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) \exp[i\varphi(\mathbf{r})] \exp(i\omega t) = U(\mathbf{r}) \exp(i\omega t),$$

kde ω je úhlová frekvence vlny a $a(\mathbf{r})$ a $\varphi(\mathbf{r})$ jsou funkce polohy \mathbf{r} takové, že komplexní vlnová funkce vyhovuje vlnové rovnici (1.1). Vlnová funkce je pak reálnou částí komplexní vlnové funkce. Část komplexní vlnové funkce nezávislou na čase, tedy $U(\mathbf{r})$, nazýváme komplexní amplitudou vlny. Intenzita v bodě \mathbf{r} je pak v souladu s (1.2) rovna $I(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|^2$. [4, s. 45]

1.1. Interference koherentních vln

Vlnová rovnice (1.1) je lineární, z čehož plyne, že nacházejí-li se dvě vlny v jedné oblasti prostoru, výsledná vlnová funkce je součtem vlnových funkcí těchto vln. [4, s. 63]

Mějme dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami $U_1(\mathbf{r})$ a $U_2(\mathbf{r})$ v bodě \mathbf{r} . Jejich superpozicí je monochromatická vlna stejné frekvence s komplexní amplitudou

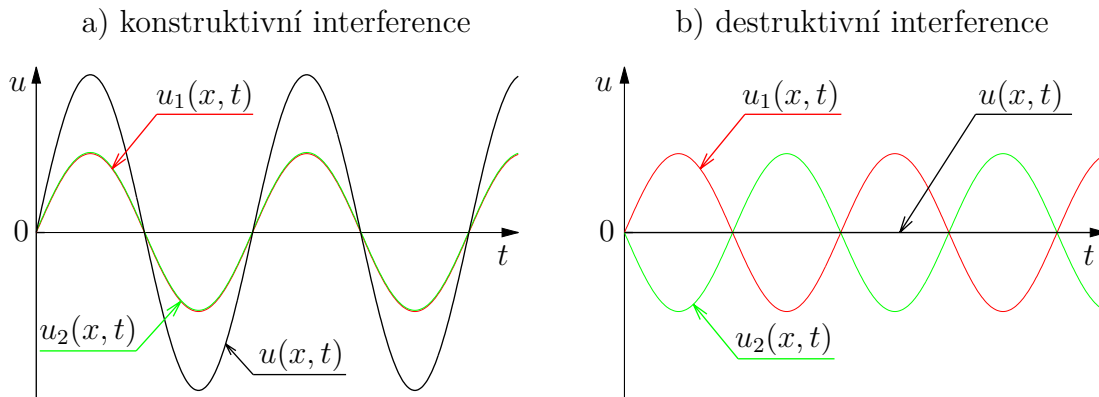
$$U(\mathbf{r}) = U_1(\mathbf{r}) + U_2(\mathbf{r}).$$

Jsou-li intenzity těchto vln $I_1 = |U_1(\mathbf{r})|^2$ a $I_2 = |U_2(\mathbf{r})|^2$, pak intenzita výsledné vlny je

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (1.3)$$

kde $\Delta\varphi$ je rozdíl fází obou vln v bodě \mathbf{r} . Mohou nastat dva extrémní případy – konstruktivní interference v případě, že je fázový rozdíl vln je roven sudému násobku π , a destruktivní interference, je-li fázový rozdíl vln roven lichému násobku π (viz obrázek 1.1). [4, s. 63]

1. INTERFERENCE



Obrázek 1.1: Dva extrémní případy při skládání dvou koherentních vln: a) konstruktivní interference (fázový rozdíl vln je roven sudému násobku π), b) destruktivní interference (fázový rozdíl vln je roven lichému násobku π). Podle [5].

1.2. Koherenční délka

V předchozí části byla popsána interference dvou vln, které mají shodnou vlnovou délku a polarizaci a jejichž fázový rozdíl se nemění, tedy interference koherentních vln, tj. vln, jejichž chování je předvídatelné. Skutečné zdroje světla však vyzařují vlny, které jsou více či méně náhodné.

Mějme vlnu popsanou v čase t a bodě \mathbf{r} komplexní vlnovou funkcí $U(\mathbf{r}, t)$. Pro popis časové koherence, tedy korelovanosti (podobnosti) vlny v různých časech t a $t + \tau$ v daném bodě \mathbf{r} , zavádíme komplexní stupeň časové koherence

$$g(\tau) = \frac{\langle U^*(\mathbf{r}, t)U(\mathbf{r}, t + \tau) \rangle}{\langle U^*(\mathbf{r}, t)U(\mathbf{r}, t) \rangle},$$

přičemž platí $0 \leq |g(\tau)| \leq 1$. Pro úplně časově koherentní záření je $|g(\tau)| = 1$ (pro každé τ), pro nekoherentní $|g(\tau)| = 0$, v jiném případě říkáme, že záření je částečně koherentní. [4, s. 347]

Jestliže $|g(\tau)|$ klesá monotónně s τ , pak koherenční dobou τ_c nazýváme takovou hodnotu τ , při které nabývá $|g(\tau)|$ nějaké definované hodnoty, např. $1/2$ nebo $1/e$. Dále budeme za koherenční dobu považovat takovou dobu τ_c , že $|g(\tau_c)| = 1/2$. Vzdálenost

$$l_c = c\tau_c,$$

kde c je rychlost světla a τ_c koherenční doba, tedy vzdálenost, kterou světlo urazí za koherenční dobu, označujeme jako koherenční délku. Je-li doba potřebná pro průchod světelné vlny optickým systémem menší než koherenční doba, pak říkáme, že vlna je vůči tomuto systému koherentní. [4, s. 348]

Koherenční délku můžeme odhadnout jako

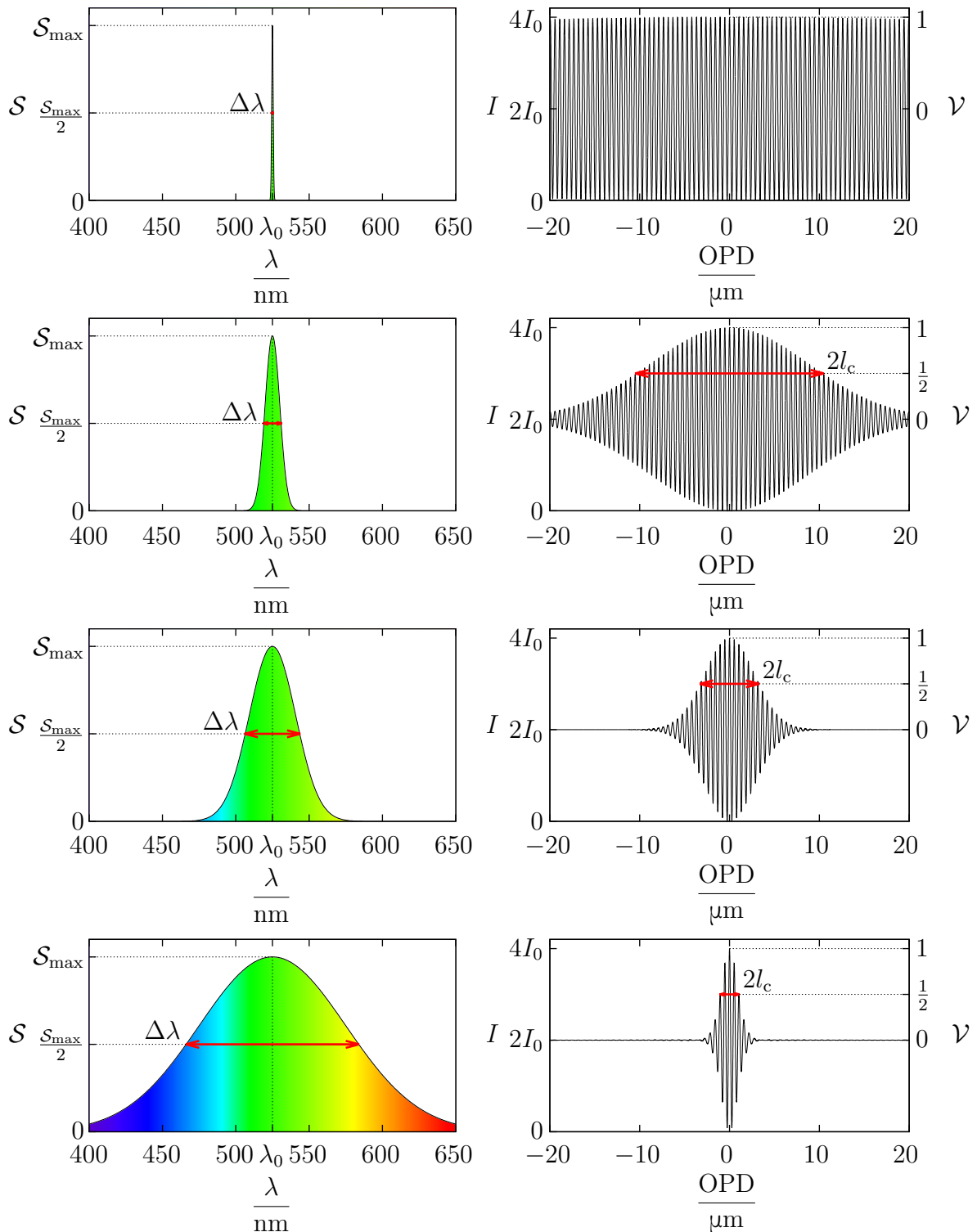
$$l_c \sim \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (1.4)$$

kde λ_0 je střední vlnová délka zdroje a $\Delta\lambda$ šířka jeho spektra, viz obrázek 1.2. [6, s. 356]

Při interferenci částečně koherentního světla je možné koherenční délku zjistit též pomocí viditelnosti (kontrastu) proužků

$$\mathcal{V} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

kde I_{\max} je maximální a I_{\min} minimální intenzita interferenčních proužků v okolí daného rozdílu optických drah dvou vln. Koherenční délka je rovna takovému rozdílu optických drah, při kterém $\mathcal{V}|_{l_c} = 1/2$, viz obrázek 1.2. [4, s. 360]



Obrázek 1.2: Koherenční délka l_c závisí na šířce spektra $\Delta\lambda$ přibližně dle rovnice (1.4). Vlevo jsou čtyři různá spektra zdrojů, vpravo jsou pro každé z nich vypočítané závislosti intenzity na rozdílu optických drah. Jedná se o interferenci dvou vln s intenzitou I_0 . Koherenční délka l_c je takový rozdíl optických drah, při kterém je viditelnost proužků $\mathcal{V}|_{l_c} = 1/2$. Podle [5], upraveno (interferogramy jsou vypočítány dle spektra).

1. INTERFERENCE

2. Laserová interferometrie

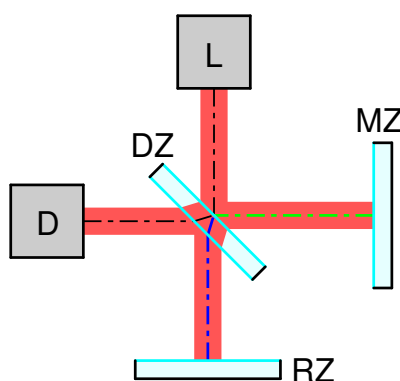
Laser je zdrojem světla s velkou koherenční délkou, k interferenci tedy dochází i při větších rozdílech optických drah. Frekvence (a tedy i vlnová délka) laseru navíc může být dostatečně stabilní a přesně známa, díky čemuž je možné laserové interferometry využít k přesnému měření délek. [3]

Tato kapitola obsahuje přehled základních typů laserových interferometrů, popis několika metod měření délek pomocí laserového interferometru a je zde též diskutován vliv indexu lomu vzduchu na interferometrická měření, a to včetně popisu metod stanovení jeho hodnoty.

2.1. Základní typy laserových interferometrů

2.1.1. Michelsonův interferometr

Jedním ze základních typů laserových interferometrů je Michelsonův interferometr (obrázek 2.1). Svazek světla je děličem rozdělen na dva (jedná se o dvousvazkový interferometr), přičemž každý z nich se odráží od zrcadla (pohyblivé zrcadlo označujeme jako měřící, druhé jako referenční), na děliči se svazky opět spojí a dojde k interferenci, kterou detekujeme. Je-li rozdíl optických drah ve větvích interferometru roven celočíselnému násobku vlnové délky, pak dojde ke konstruktivní interferenci a detekujeme maximum intenzity na výstupu. Je-li roven lichému násobku poloviny vlnové délky, pak dojde k destruktivní interferenci a detekujeme minimum intenzity (viz obrázek 1.1).



Obrázek 2.1: Schéma Michelsonova laserového interferometru. L – zdroj světla (laser), DZ – děličí zrcadlo, RZ – referenční zrcadlo, MZ – měřící (pohyblivé) zrcadlo, D – detektor. Jestliže je rozdíl optických drah ve větvích interferometru (zelená a modrá) roven celočíselnému násobku vlnové délky, dojde ke konstruktivní interferenci (intenzita na výstupu interferometru bude maximální), pokud je roven lichému násobku poloviny vlnové délky, dojde k interferenci destruktivní (intenzita na výstupu interferometru bude minimální). Podle [3].

2. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Předpokládejme, že intenzity vln v obou větvích interferometru jsou stejné, rovny I_0 . Pak dle rovnice (1.3) závislost intenzity na výstupu interferometru na rozdílu optických délek větví interferometru z je možné pro koherentní záření vyjádřit jako

$$I(z) = 2I_0 [1 + \cos(2kz)] , \quad (2.1)$$

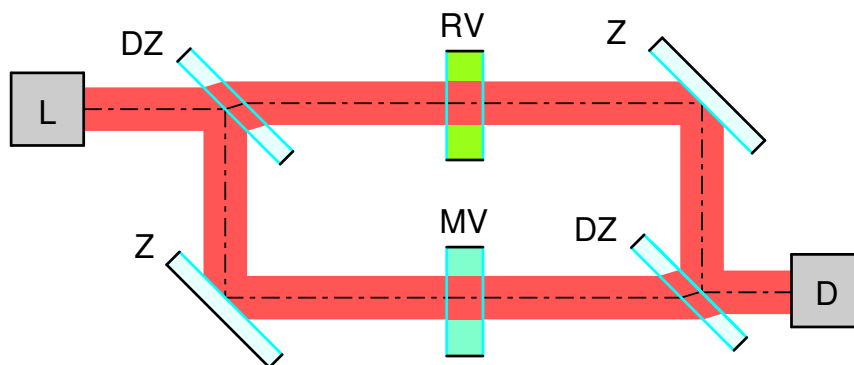
kde $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo (λ je vlnová délka použitého záření), přičemž optickou délkou větve interferometru je myšlena optická dráha, kterou světlo urazí od rozdělení svazku na děliči po jeho opětovném sloučení na téže místě. Mezi dvěma po sobě následujícími maximy intenzity na výstupu interferometru se tedy měřící zrcadlo posune o polovinu vlnové délky zdroje.

Michelsonův interferometr je možné použít např. pro měření vzdálenosti, rovinnosti či měření indexu lomu transparentních prostředí. [3]

Pokud by dělič byl planoparalelní, pak by světlo odražené od jeho druhé lámavé plochy interferovalo se světlem odraženým od děličí plochy (na obrázku 2.1 bychom v místě měřícího zrcadla pozorovali interferenci). Tohoto jevu je možné využít při kolimaci koherentního záření, v interferometru je však nežádoucí. Proto se používá dělič tvaru klínu, který způsobí, že svazky odražené od různých lámavých ploch děliče budou svírat takový úhel, že interferenci pozorovat nebudeme. Dalším opatřením proti tomuto jevu je použití antireflexních vrstev.

2.1.2. Machův–Zehnderův interferometr

V Machově–Zehnderově interferometru (obrázek 2.2) je svazek rozdělen na dva – referenční a měřící, jedná se tedy též o dvousvazkový interferometr. Po průchodu větvemi interferometru jsou svazky opět spojeny a dochází k interferenci, přičemž intenzita na výstupu závisí na rozdílu optických drah ve větvích interferometru. Tento typ interferometru je vhodný např. ke zjišťování nehomogenit indexu lomu transparentních prostředí. [3]



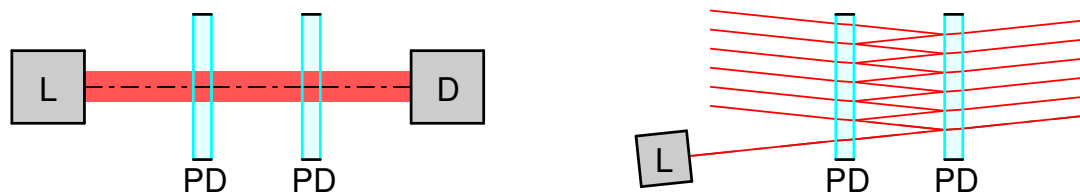
Obrázek 2.2: Schéma Machova–Zehnderova interferometru. L – zdroj světla, DZ – děličí zrcadla, Z – zrcadla, RV – referenční vzorek, MV – měřený vzorek, D – detektor. Podle [3].

2.1.3. Fabryův–Perotův interferometr

Fabryův–Perotův interferometr (obrázek 2.3) je interferometr mnohosvazkový. Je tvořen dvojicí rovnoběžných zrcadel s vysokou odrazivostí tvořících optický rezonátor. Světlo se tedy v interferometru odráží a jen malá část prochází. Na detektoru detekujeme maximum intenzity v případě, že dojde ke konstruktivní interferenci všech prošlých vln, což nastane, je-li vzdálenost mezi zrcadly rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky světla.

2.2. MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POMOCÍ INTERFEROMETRU

Tento interferometr se používá pro měření spektrálního složení optického záření a je též základem většiny laserů. [3]



Obrázek 2.3: Schéma Fabryho–Perotova interferometru (vlevo) a schematicky naznačený chod svazku interferometrem (vpravo). L – zdroj světla, PD – vzájemně paralelní zrcadla s velkou odrazivostí, D – detektor. Podle [3].

2.2. Měření vzdálenosti pomocí interferometru

Známe-li vlnovou délku použitého zdroje záření (laseru), pak můžeme pomocí Michelsonova interferometru měřit změnu polohy měřícího zrcadla. Nejjednodušší metoda měření spočívá v počítání proužků, kdy se dle rovnice (2.1) měřící zrcadlo mezi dvěma po sobě následujícími maximy intenzity posune o polovinu vlnové délky. Počítání proužků však není příliš přesné, nedokážeme snadno rozlišit dvě polohy měřícího zrcadla, jejichž vzdálenost je menší než čtvrtina vlnové délky. Dále pouze z intenzity na výstupu interferometru nedokážeme zjistit, kterým směrem se měřící zrcadlo interferometru pohybuje. Větší přesnosti detekce a v některých případech též zjištění směru pohybu měřícího zrcadla můžeme dosáhnout některou z následujících metod. [7]

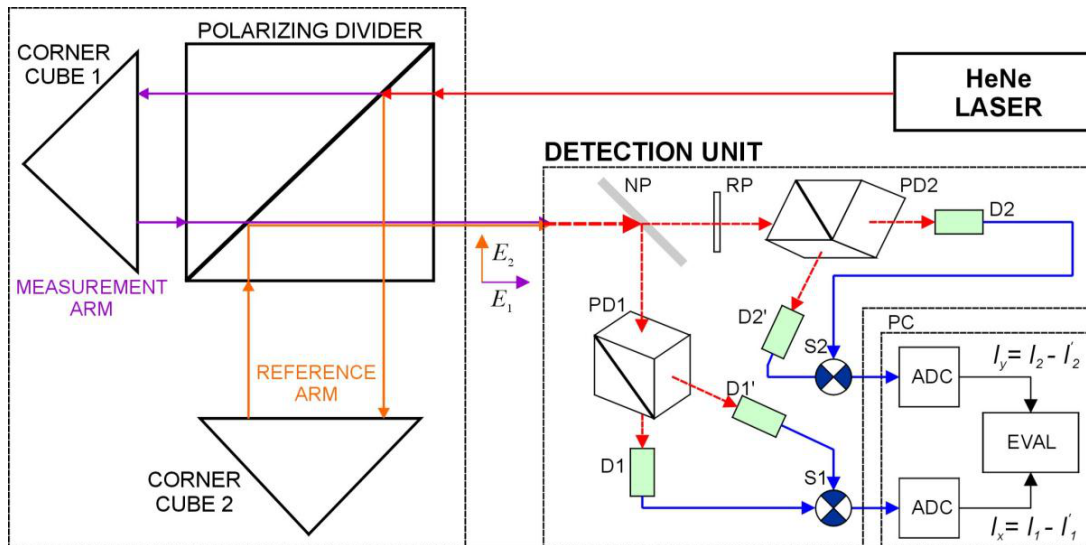
2.2.1. Homodynní detekce

Při homodynní detekci (obrázek 2.4) využíváme lineární polarizaci zdroje záření (laseru). Svazek vstupuje do polarizujícího děliče pod polarizačním úhlem 45° , kde je rozdělen na dva svazky s navzájem kolmou lineární polarizací, kvůli čemuž na výstupu interferometru nepozorujeme interferenci. Svazek je na výstupu rozdělen do dvou větví. V každé z větví je vložen polarizující dělič natočený vůči polarizacím vstupujících vln pod úhlem 45° , čímž dojde ke stočení polarizací vstupujících vln do jedné roviny a ke vzniku interference. Tu detekujeme v každé větvi pomocí dvou detektorů, přičemž na detektorech na obrázku 2.4 označených $D1'$, $D2'$ je fáze interferenčního signálu zpožděna o π oproti detektorům $D1$ a $D2$. V jednom ze svazků je vložena $\lambda/4$ deska, což způsobí fázové zpoždění interferenčního signálu v této větvi o $\pi/2$. Vyneseme-li signály z rozdílových zesilovačů $S1$, $S2$ do kartézských souřadnic, dostaneme obecně kuželosečku. Jestliže ji parametrizujeme v polárních souřadnicích, pak změna úhlu vyjadřuje změnu optické dráhy v měřící větvi interferometru a smysl otáčení vyjadřuje směr pohybu měřícího zrcadla. [3]

2.2.2. Heterodynní detekce

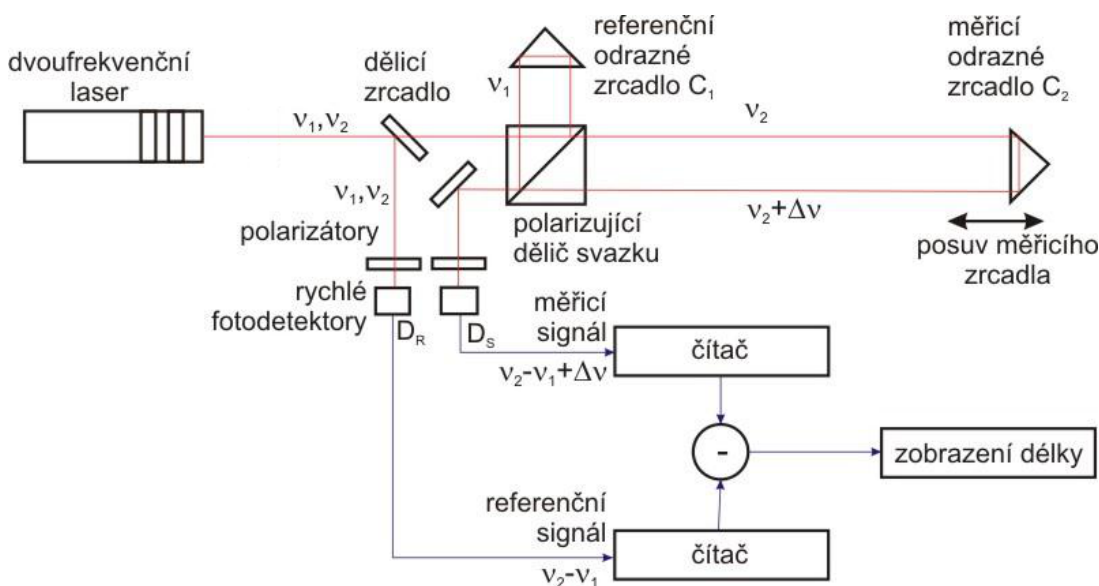
Heterodynní detekce (obrázek 2.5) využívá zdroj s dvěma různými frekvencemi, jejichž polarizace je navzájem kolmá. Svazek je nejprve dělicím zrcadlem rozdělen, aby bylo možné po průchodu polarizátorem, jehož rovina polarizace svírá s rovinami polarizace obou vln 45° (dojde tedy ke stočení roviny polarizace obou vln a ke vzniku interference), pomocí detektoru (na obrázku 2.5 označeném D_R) změřit záznamovou frekvenci. Ta je rovna rozdílu frekvencí zdroje. Zbytek svazku vstupuje do interferometru s polarizujícím děličem.

2. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.4: Schéma uspořádání interferometru s homodynní detekcí. NP – dělič, RP – $\lambda/4$ deska, PD1, PD2 – polarizující děliče, D1, D1', D2, D2' – fotodetektory, S1, S2 – rozdílové zesilovače. Převzato z [3].

V důsledku odlišných polarizací se vlna s jednou optickou frekvencí odráží do referenční větve, kdežto vlna s druhou optickou frekvencí prochází do měřicí větve interferometru. Je-li měřící zrcadlo interferometru nehybné, pak jsou frekvence obou vln na výstupu interferometru stejné jako na vstupu, a tedy na druhém detektoru (označeném D_S) detekujeme stejnou zánějovou frekvenci jako na detektoru prvním (D_R). V případě pohybu měřícího zrcadla dochází k fázovému zpoždění či zrychlení vlny od něho se odrážející (dle směru pohybu), a tedy zánějová frekvence se změní. Odečtením frekvencí naměřených na obou detektorech získáme změnu zánějové frekvence, z které lze určit velikost i směr rychlosti měřícího zrcadla. Integrací následně určíme změnu jeho polohy. [3]



Obrázek 2.5: Schéma uspořádání interferometru s heterodynní detekcí. Upraveno z [3].

2.2.3. Hilbertova transformace

Změnu polohy měřícího zrcadla lze v případě, že se nemění směr jeho pohybu, měřit monitorováním interferenčního signálu. Použijeme dvou signálů fázově vzájemně posunutých o $\pi/2$ jako v případě homodynní detekce, avšak fázově posunutý signál vypočítáme z naměřeného interferenčního signálu pomocí Hilbertovy transformace. [7] Nejprve z naměřeného signálu odfiltrujeme stejnosměrnou složku, např. fitováním polynomem (protože se průměrná intenzita může vlivem neoptimálního nastavení interferometru v průběhu změny polohy měřícího zrcadla měnit, použijeme např. polynom 2. stupně) a jeho odečtením od naměřených hodnot. Dále vypočítáme Hilbertovu transformaci $\mathcal{H}\{u(m)\}$ signálu $u(m)$ na vzorku m , čímž získáme signál fázově posunutý o $\pi/2$. Pak

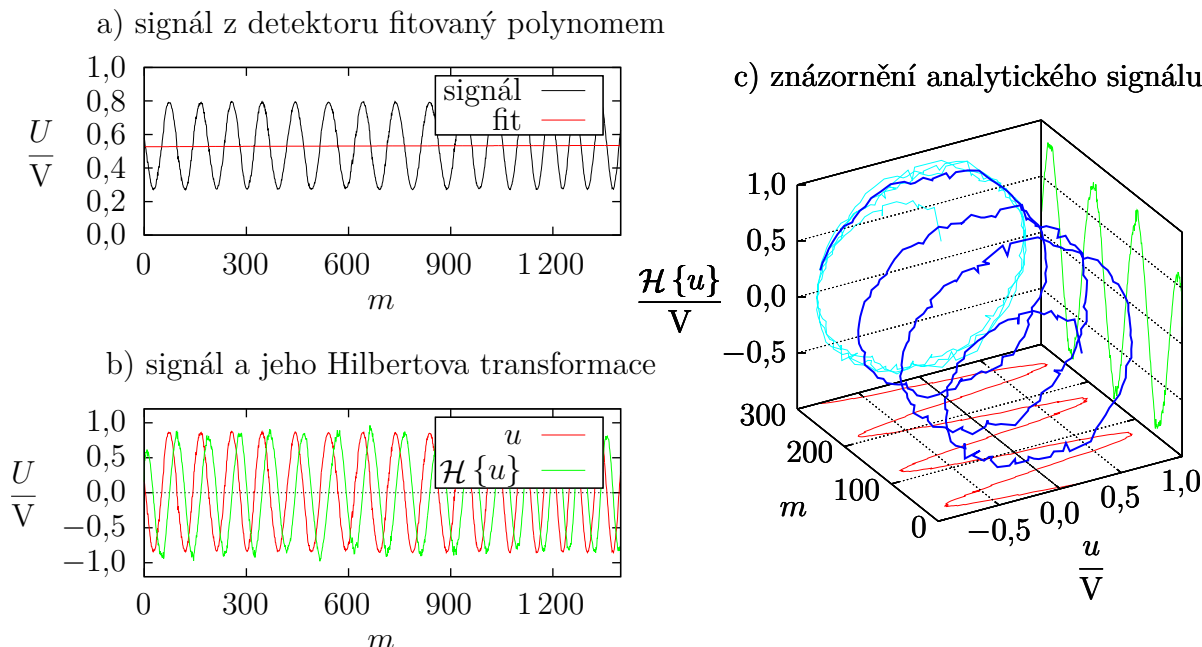
$$u_a(m) = u(m) + i\mathcal{H}\{u(m)\}$$

je analytický signál, jehož argument $\arg(u_a)$ udává fázi φ naměřeného interferenčního signálu. Následný výpočet změny polohy je stejný jako v případě homodynní detekce. Je třeba provést rozbalení fáze, poté změnu polohy měřícího zrcadla interferometru určíme jako

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi, \quad (2.2)$$

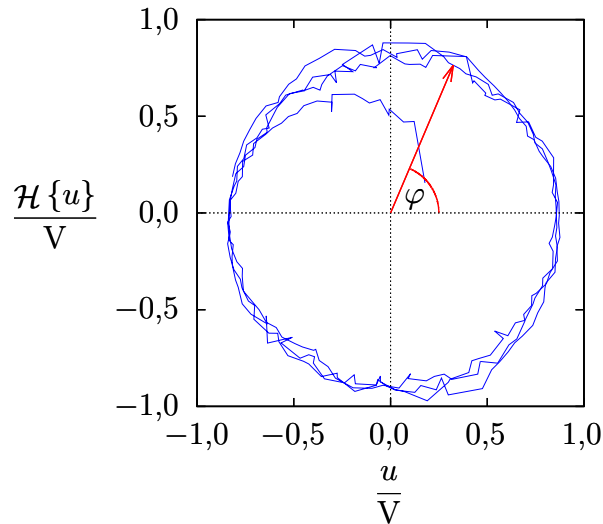
kde λ je vlnová délka laseru a $\Delta\varphi$ je zjištěná změna fáze.

Postup je znázorněn na obrázcích 2.6 a 2.7, na kterých je též vidět, že několik prvních vzorků (odpovídajících úhlu asi $\pi/2$) je třeba vynechat, jelikož je fázově posunutý signál vypočítán chybně. Při měření nás vždy zajímá rozdíl fází dvou vzorků (a odpovídající rozdíl poloh měřícího zrcadla), proto je třeba, aby měření bylo spuštěno (a ukončeno) ve vzdálenosti větší než asi osmina vlnové délky od bodů, které chceme detekovat.



Obrázek 2.6: Vytvoření analytického signálu pomocí Hilbertovy transformace: a) nejprve se od naměřeného interferenčního signálu odečte jeho stejnosměrná složka pomocí fitování polynomem, b) provede se Hilbertova transformace, c) ze signálu a transformovaného signálu se vytvoří analytický signál a ze změny jeho fáze můžeme dle vztahu (2.2) určit změnu polohy měřícího zrcadla (viz obrázek 2.7). Uvedené signály byly naměřeny na realizované sestavě.

2. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE



Obrázek 2.7: Zjištění změny polohy měřícího zrcadla ze změny fáze analytického signálu vytvořeného pomocí Hilbertovy transformace (viz obrázek 2.6). Změna fáze φ odpovídá změně polohy měřícího zrcadla dle vztahu (2.2). Z obrázku je zřejmé, že počátek (a též konec, který na obrázku není zaznačen) analytického signálu (odpovídající úhlu asi $\pi/2$) je vypočítán chybně, a tedy je třeba spustit a ukončit měření o odpovídající vzdálenost dále od bodů, jejichž polohu chceme měřit. Uvedený signál byl naměřen na realizované sestavě.

Pro výpočet změny polohy měřícího zrcadla Michelsonova laserového interferometru pomocí analýzy interferenčního signálu byla vytvořena funkce `interf2pos` pro prostředí MATLAB (viz přílohy). Vstupem je naměřený interferenční signál a vlnová délka zdroje, výstupem pak odpovídající polohy měřícího zrcadla.

2.3. Index lomu vzduchu

Při použití interferometrů dokážeme měřit vzdálenost jako násobky vlnové délky. Vlnové délky laserů známe pro vakuum (známe frekvenci laserového záření). Měření však ve většině případů probíhá na vzduchu, kde se světlo šíří pomaleji. Poměr rychlosti šíření světla ve vakuu a v jiném prostředí udává index lomu $n > 1$ tohoto prostředí. Vlnová délka je definována jako $\lambda = c/f$, kde c je fázová rychlost světla v daném prostředí a f je frekvence vlnění. Jelikož $c = c_0/n$, kde c_0 je rychlost světla ve vakuu, pak

$$\lambda = \frac{c_0}{nf},$$

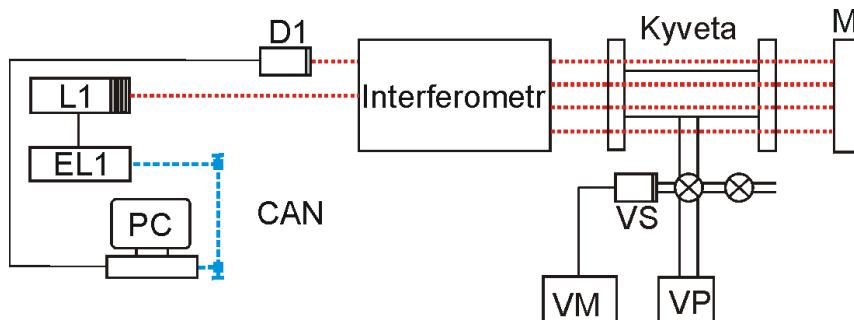
tedy vlnová délka světla s danou frekvencí je nepřímo úměrná indexu lomu prostředí, ve kterém se světlo šíří. Pro přesné měření vzdálenosti pomocí laserového interferometru proto potřebujeme znát index lomu prostředí, ve kterém měření probíhá, což je obvykle vzduch. [3], [4]

Index lomu vzduchu je možné měřit několika metodami, které lze rozdělit na přímé a nepřímé. [3]

2.3.1. Přímé metody měření indexu lomu vzduchu

Přímé metody měření indexu lomu vzduchu využívají ke stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu srovnání optické dráhy ve vzduchu a ve vakuu. Základní uspořádání laserového

refraktometru je na obrázku 2.8. Základem sestavy je dvoukomorová kyveta. Svazek v referenční větvi laserového interferometru prochází vnitřní komorou kyvety, svazek v měřící větvi vnější komorou. Na počátku měření je v obou komorách kyvety vzduch, při jeho čerpání z vnitřní části kyvety dochází ke změně optické dráhy referenčního svazku. Přibližně při tlaku 100 Pa se již optická dráha přestává měnit. Hodnotu indexu lomu vzduchu pak stanovíme ze záznamu průběhu interferenčního signálu. [3]



Obrázek 2.8: Schéma laserového refraktometru s čerpanou kyvetou. L1 – laser, D1 – detektor, M – zrcadlo, VP – vakuová pumpa, VS, VM – měrka tlaku. Z vnitřní komory dvoukomorové kyvety je vyčerpán vzduch, čímž dojde ke změně optické dráhy referenčního svazku interferometru. Ze záznamu interferenčního signálu pak můžeme stanovit hodnotu indexu lomu vzduchu. Převzato z [3].

2.3.2. Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu

Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu jsou založeny na výpočtu hodnoty indexu lomu vzduchu z jiných veličin, kterými jsou teplota, tlak a vlhkost vzduchu a koncentrace některých plynů (nejčastěji oxidu uhličitého). [8]

Výhodou nepřímých metod měření indexu lomu vzduchu je jednoduchost, nevyžadují žádné optické komponenty. Nevýhodou je naopak nižší přesnost, pro mnohá použití je však dostačující.

Nechť σ je vlnočet (převrácená hodnota vlnové délky), t teplota vzduchu, f parciální tlak vodní páry a x koncentrace CO_2 ve vzduchu. Index lomu suchého vzduchu za normálních podmínek n_s určíme [9] dle vztahu

$$(n_s - 1) \cdot 10^8 = 8342,54 + \frac{2406147}{130 - \frac{\sigma}{\mu\text{m}^{-1}}} + \frac{15998}{38,9 - \frac{\sigma}{\mu\text{m}^{-1}}}. \quad (2.3)$$

Pro koncentraci x CO_2 ve vzduchu platí korekce [10]

$$(n_x - 1) = (n_s - 1) \left[1 + \left(0,529 - 0,0036 \cdot \frac{\sigma}{\mu\text{m}^{-1}} \right) \right] (x - 0,0004), \quad (2.4)$$

která je nulová pro koncentraci 400 ppm. Následně provedeme korekci na teplotu a tlak [9]

$$(n_{x,t,p} - 1) = (n_x - 1) \frac{\frac{p}{\text{Pa}}}{96085,43} \frac{1 + 10^{-8} \left(0,601 - 0,00972 \cdot \frac{t}{^\circ\text{C}} \right) \frac{p}{\text{Pa}}}{1 + 0,0036610 \cdot \frac{t}{^\circ\text{C}}}. \quad (2.5)$$

Nakonec provedeme korekci na parciální tlak vodní páry [9]

$$n_{x,t,p,f} - n_{x,t,p} = -\frac{f}{\text{Pa}} \left(3,7345 - 0,0401 \cdot \frac{\sigma}{\mu\text{m}^{-1}} \right) \cdot 10^{-10}. \quad (2.6)$$

2. LASEROVÁ INTERFEROMETRIE

Pak $n_{x,t,p,f}$ je pro danou vlnovou délku index lomu vzduchu při teplotě t , tlaku vzduchu p , parciálním tlaku vodní páry f a koncentraci CO_2 x .

Obvykle neznáme přímo hodnotu parciálního tlaku vodní páry f , ale hodnotu relativní vlhkosti vzduchu. Ta je definována jako poměr parciálního tlaku vodní páry a tlaku nasycené vodní páry a je většinou udávána v procentech. Tlak nasycené vodní páry můžeme pro danou termodynamickou teplotu T určit přibližně jako

$$p_{f,\text{sat}} = 1 \text{ Pa} \cdot \exp(AT^2 + BT + C + DT^{-1}), \quad (2.7)$$

kde $A = 1,2378847 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$, $B = -1,9121316 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$, $C = 33,93711047$, $D = -6,3431645 \cdot 10^3 \text{ K}$. [11]

Rovnice (2.3)–(2.6) umožňují (při přesném měření všech veličin) určit index lomu vzduchu s přesností asi $3 \cdot 10^{-8}$. [9]

Dle rovnic (2.3)–(2.7) byla vytvořena funkce `air_index_edlen` pro prostředí MATLAB (viz přílohy), která index lomu vzduchu pro zadanou vlnovou délku zdroje, teplotu, tlak a relativní vlhkost vzduchu a koncentraci CO_2 vypočítá. Hodnot veličin je možné zadat více (jsou-li měřeny průběžně během experimentu), pak je určena průměrná hodnota indexu lomu a nejistota typu A. Je možné též zadat nejistoty každé veličiny, pak je podle zákona šíření nejistot vypočítána nejistota typu B. Výstupem funkce je průměrná hodnota indexu lomu vzduchu a kombinovaná nejistota (bylo-li provedeno jen jedno měření, pak nejistota typu B; bylo-li provedeno více měření, ale nejsou zadány nejistoty měřených veličin, pak nejistota typu A).

3. Interferometrie nízké koherence

Interferometrie nízké koherence (LCI – low-coherence interferometry) nebo též bílá interferometrie (WLI – white light interferometry) využívá krátké koherenční délky použitého zdroje záření, díky čemuž dochází k interferenci jen při velmi malých rozdílech optických drah (viz obrázek 1.2). Toho je možné využít například pro bezkontaktní analýzu profilu povrchů, drsnosti povrchů či měření tloušťky tenkých vrstev. Zdrojem záření s krátkou koherenční délkou může být např. halogenová lampa, xenonová lampa či LED. [12]

Tato kapitola popisuje princip Michelsonova interferometru při použití zdroje s krátkou koherenční délkou a jeho využití v kombinaci s laserovým zdrojem pro optickou analýzu profilu povrchů. Převážná část kapitoly je věnována metodám detekce vyváženého stavu Michelsonova interferometru, tedy středu interferenčního proužku v interferometrii nízké koherence. Metody jsou detailně popsány včetně některých úprav provedených v rámci této práce. Je popsána též implementace uvedených metod v prostředí MATLAB. Implementované metody jsou srovnány na základě měření a numerické simulace podle tří kritérií, která byla zvolena dle účelu použití metod – pro analýzu profilu povrchů. Na závěr jsou vybrány metody vhodné pro tento účel.

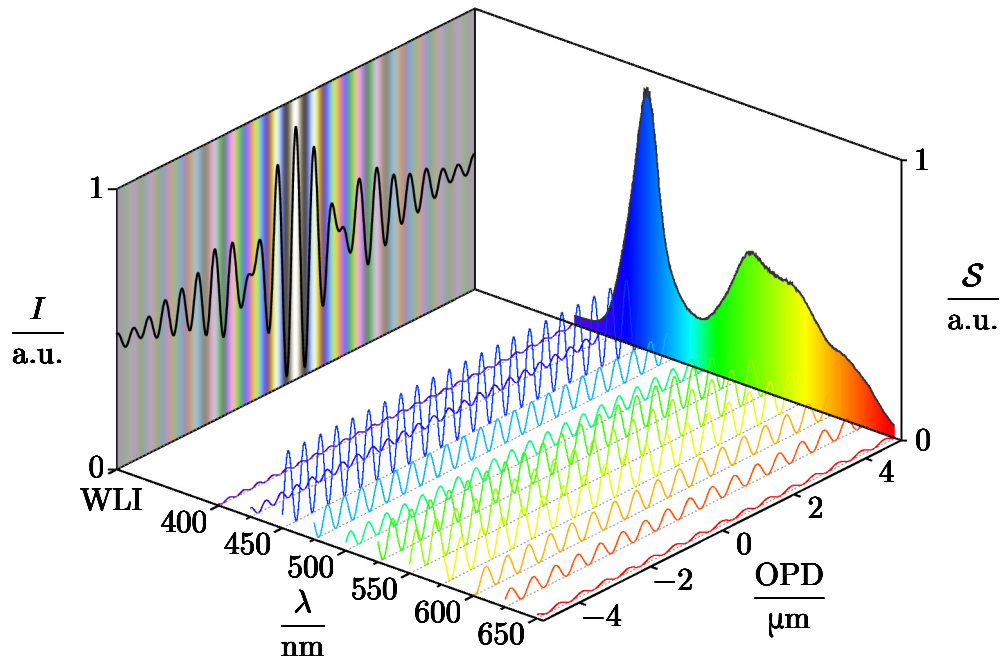
Bílé světlo je složeno z různých vlnových délek. Zdroj bílého světla si tedy můžeme představit jako mnoho navzájem nekoherentních zdrojů koherentního záření (viz obrázek 3.1 a také obrázek 1.2) [4, s. 72]. Na této představě jsou založeny některé metody detekce středu interferenčního proužku, tj. části interferenčního signálu, která odpovídá nulovému rozdílu optických drah ve větvích Michelsonova interferometru.

3.1. Michelsonův interferometr ve WLI

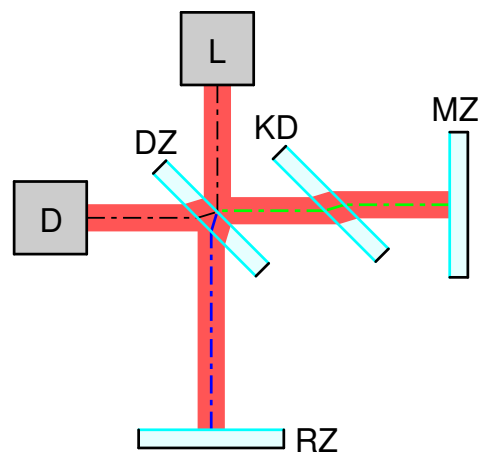
V Michelsonově interferometru dochází k interferenci, je-li rozdíl optických drah v jeho větvích menší či srovnatelný s koherenční délkou zdroje (viz obrázek 1.2). V případě použití zdroje s krátkou koherenční délkou tedy dochází k interferenci jen v malém intervalu poloh měřicího zrcadla interferometru. Analýzou interferenčního signálu (tj. závislosti intenzity na výstupu interferometru na poloze měřicího zrcadla) je pak možné určit takovou polohu měřicího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné.

Svazky na výstupu Michelsonova interferometru při použití zdroje s krátkou koherenční délkou interferují tehdy, je-li rozdíl optických drah v obou větvích interferometru menší či srovnatelný s koherenční délkou pro všechny vlnové délky zdroje. Proto je třeba, aby rozdíl optických drah ve větvích interferometru téměř nezávisel na vlnové délce (tedy byl pro všechny vlnové délky zdroje téměř stejný). V interferometru na obrázku 2.1 tomu tak není, protože po rozdělení svazek v jedné větvi prochází pouze vzduchem (u kterého pro jednoduchost uvažujeme index lomu roven 1 pro všechny vlnové délky), kdežto v druhé větvi projde vrstvou skla (a to dvakrát). Sklo vykazuje disperzi, jeho index lomu závisí na vlnové délce. Například pro sklo SCHOTT N-BK7, které vykazuje normální disperzi (index lomu se s rostoucí frekvencí zvyšuje) je index lomu pro Fraunhoferovu čáru F (tj. vl-

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

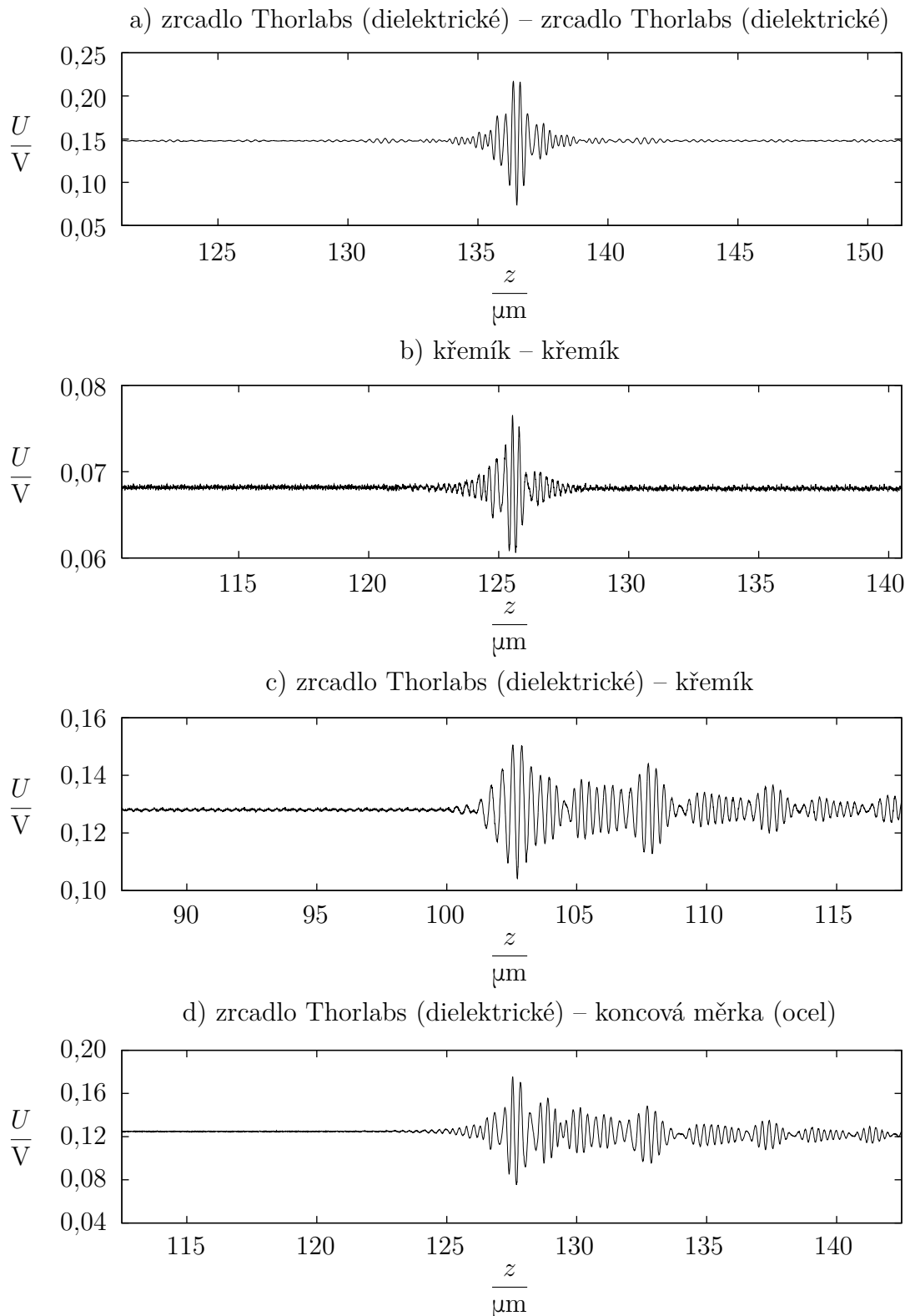


Obrázek 3.1: Interferenci bílého světla je možné si představit jako součet intenzit interferencí koherentních (monochromatických) zdrojů. Na pravé zadní rovině grafu je znázorněno spektrum bílé LED, na levé zadní rovině pak interferogram (závislost intenzity na výstupu interferometru na rozdílu optických drah) vzniklý v Michelsonově interferometru při použití této LED (čára odpovídá intenzitě, na pozadí je přibližně znázorněna též barva, kterou budeme na výstupu interferometru pozorovat). Interferogram vznikne součtem kosinů různých vlnových délek (znázorněny na dolní rovině) s amplitudou odpovídající spektrální hustotě S této vlnové délky ve spektru zdroje.



Obrázek 3.2: Schéma Michelsonova interferometru pro interferometrii nízké koherence. L – zdroj světla (např. LED), DZ – dělicí zrcadlo, KD – kompenzační deska, RZ – referenční zrcadlo, MZ – měřící (pohyblivé) zrcadlo, D – detektor. Interferenci budeme pozorovat, bude-li rozdíl optických drah ve větvích interferometru (modrá a zelená) menší nebo srovnatelný s koherenční délkou zdroje. Podle [3].

3.1. MICHELSONŮV INTERFEROMETR VE WLI



Obrázek 3.3: Naměřené závislosti napětí na fotodetektoru (úměrné intenzitě) na poloze měřícího zrcadla pro různé materiály ve větvích interferometru. Jsou-li materiály v obou větvích stejné, k interferenci dochází na krátké vzdálenosti, díky čemuž je snazší najít takovou polohu měřícího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

novou délkou 586,1 nm, tedy modrou barvu) $n_F = 1,52238$, pro čáru C (656,3 nm, tedy červenou barvu) $n_C = 1,51432$. Jestliže prochází svazek bílého světla sklem o tloušťce 10 mm, pak na této vzdálenosti způsobí disperze rozdíl optických drah pro čáry C a F asi 81 μm , což může být o řád více než je koherenční délka zdroje. Tento problém je možné odstranit použitím hranolu jako děliče nebo vložení kompenzační desky (stejného tvaru a ze stejného materiálu jako je dělicí zrcadlo) rovnoběžně s dělicím zrcadlem do té větve interferometru, ve které svazek sklem neprochází, viz obrázek 3.2. Jak natočení kompenzační desky ovlivňuje tvar interferenčního proužku ukazuje obrázek 4.6.

Optická dráha ve větvi interferometru závisí též na materiálu zrcadla, od kterého se svazek odráží. Pro vodivé materiály zavádíme komplexní index lomu $n + i\tilde{n}$, kde n a \tilde{n} jsou reálná čísla, přičemž reálná část (tedy n) určuje fázovou rychlost šíření světla v daném prostření a imaginární část (tedy \tilde{n} , nazývané index absorpce) charakterizuje tlumení vlny. Odráží-li se vlna procházející vzduchem o indexu lomu n_0 od rozhraní vzduchu a materiálu o indexu lomu $n + i\tilde{n}$, pak fázový rozdíl φ mezi dopadající a odraženou vlnou je dán [13] vztahem

$$\text{tg } \varphi = \frac{2n_0\tilde{n}}{n_0^2 - n^2 - \tilde{n}^2}.$$

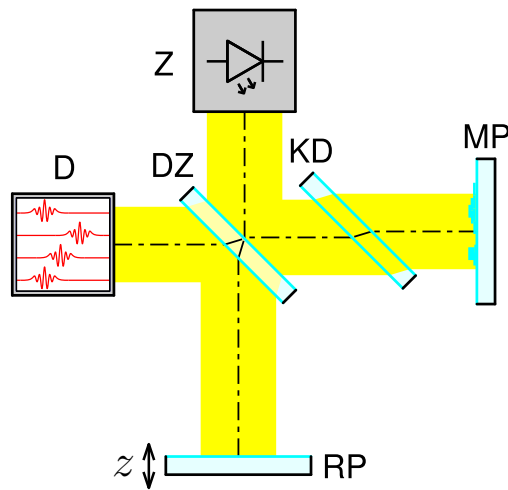
Pro dielektrika je index lomu reálný a v souladu s tímto vztahem je fázový rozdíl $\varphi = 180^\circ$. Obecně je však fázový rozdíl jiný a závislý na vlnové délce [14]. Aby rozdíl optických drah v obou větvích interferometru nezávisel na vlnové délce, je tedy třeba, aby materiály obou zrcadel byly stejné. V opačném případě může docházet k interferenci při širším intervalu poloh měřícího zrcadla (viz obrázek 3.3), což znesnadňuje detekci středu interferenčního proužku.

3.2. Analýza profilu povrchů pomocí WLI

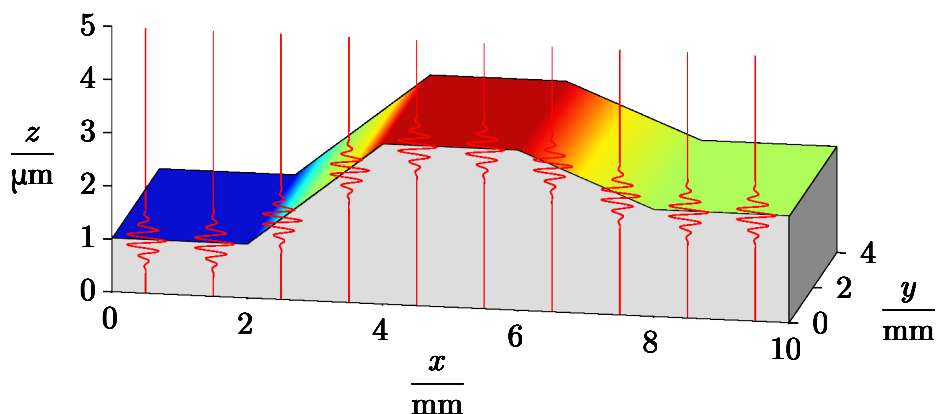
Michelsonův interferometr (obrázek 3.2) je možné využít k analýze profilu povrchů, jestliže do jedné jeho větve umístíme zkoumaný povrch a do druhé leštěný povrch ze stejného materiálu, avšak s vysokou rovinností. Jako zdroj světla použijeme široký svazek záření s krátkou koherenční délkou a jako detektor např. kameru nebo pole fotodetektorů (viz obrázek 3.4). Protože měřený povrch obecně není rovinný, je v různých bodech detektoru pozorována interference při jiné poloze měřícího zrcadla interferometru (kterým může být měřený či referenční povrch), a to tehdy, když optická dráha v obou větvích interferometru je pro tuto část svazku stejná (viz obrázek 3.6). Jestliže pro každý bod detektoru tyto polohy najdeme, dokážeme tak získat profil měřeného povrchu (viz obrázky 3.5, 3.7 a 3.8). [5]

Pro detekci změny polohy měřícího zrcadla je možné použít Michelsonův laserový interferometr, přičemž je možné použít metody popsané v části 2.2. Protože pro interferometrii nízké koherence již Michelsonův interferometr používáme, je možné tento použít i pro detekci změny polohy měřícího zrcadla, jestliže jako zdroj světla použijeme zároveň zdroj s krátkou koherenční délkou a laser. Řešení, kdy laserový i bílý svazek mají stejnou dráhu má navíc výhodu spočívající v tom, že laserový interferometr detekuje nejen změnu polohy měřícího zrcadla, ale, jelikož měří změnu rozdílu optických drah ve větvích interferometru, jakoukoliv změnu optické dráhy v obou větvích interferometru, která může v průběhu měření vzniknout např. v důsledku tepelné roztažnosti. V případě širokého laserového svazku a pole fotodetektorů je též možné sledovat případný náklon měřícího zrcadla při jeho pohybu.

3.2. ANALÝZA PROFILU POVRCHŮ POMOCÍ WLI

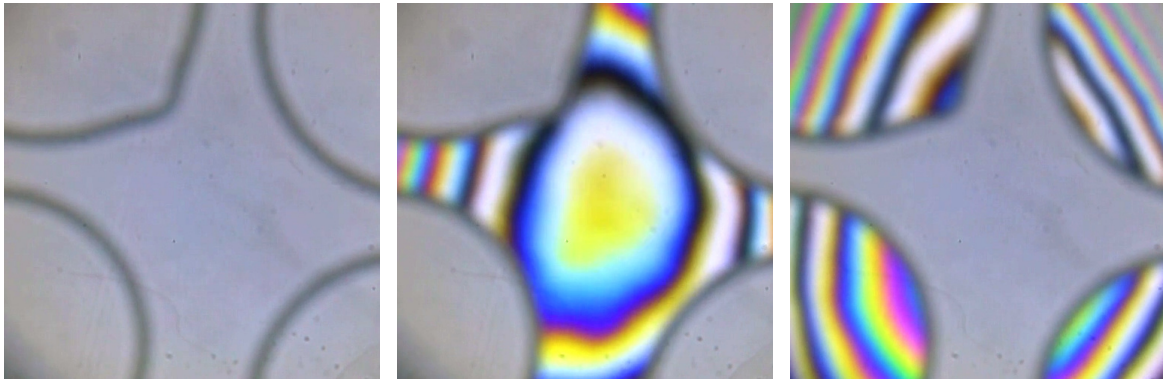


Obrázek 3.4: Schéma Michelsonova interferometru s bílým světlem pro měření profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence. Referenčním zrcadlem Michelsonova interferometru je měřený povrch MP, který není rovinný, a proto v různých částech svazku nastane interference při jiné poloze měřícího zrcadla, kterým je referenční povrch RP (viz obrázky 3.5 a 3.6), což detekujeme kamerou D. Z – zdroj bílého světla (např. LED), DZ – dělicí zrcadlo, KD – kompenzační deska, MP – měřený povrch, RP – referenční povrch, D – detektor (kamera). Podle [12].

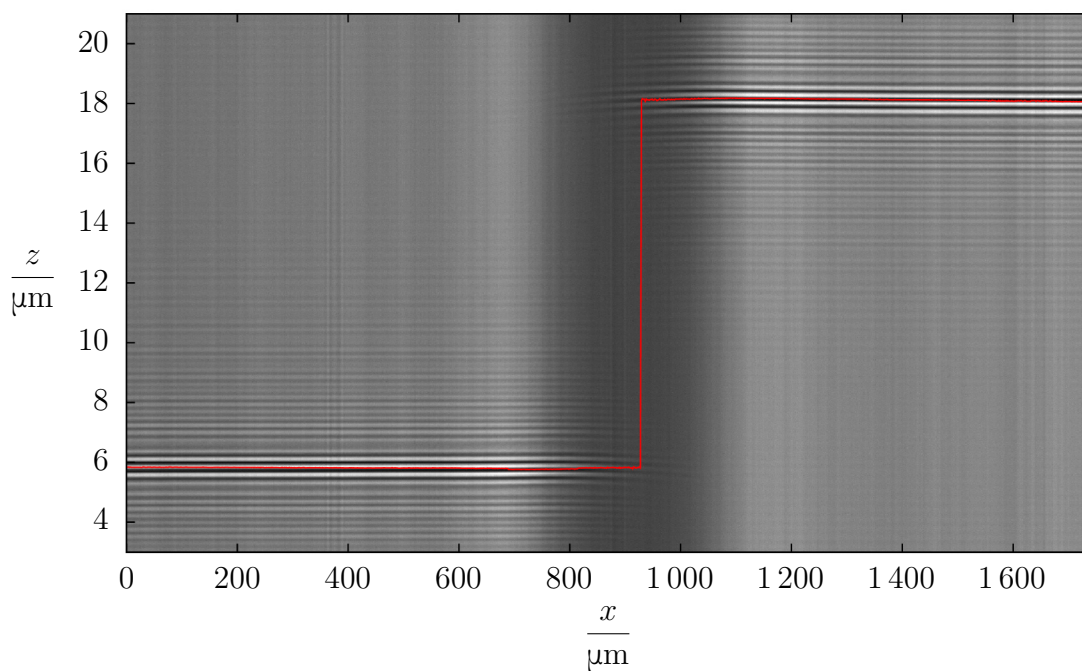


Obrázek 3.5: Měření profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence. Pro každý bod detektoru je nalezen střed interferenčního proužku, který odpovídá poloze povrchu měřeného vzorku. Podle [5].

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

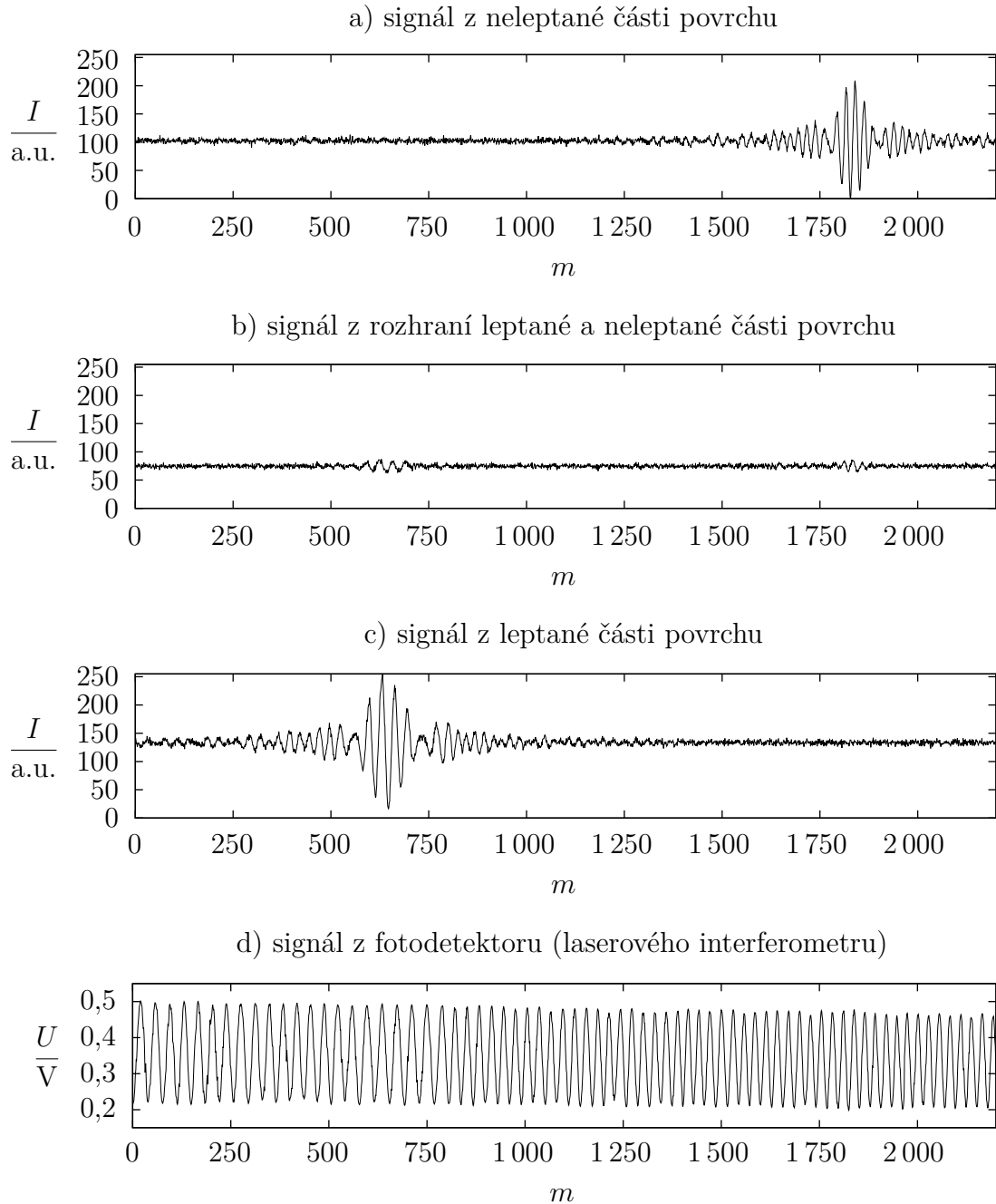


Obrázek 3.6: Fotografie pořízené digitální zrcadlovkou bez objektivu umístěnou na výstupu interferometru při třech různých polohách měřícího zrcadla. V jedné větvi interferometru byl vložen křemíkový wafer s vyleptanými strukturami hlubokými dle provedených měření asi $12,5\ \mu\text{m}$ (viz obrázek 5.1). K interferenci dochází v té části svazku, pro kterou je rozdíl optických drah ve větvích interferometru menší či srovnatelný s koherenční délkou zdroje. Bílý proužek odpovídá nulovému rozdílu optických drah (viz obrázek 3.1). Analýzou obrazu na výstupu interferometru při mnoha polohách měřícího zrcadla lze změřit profil povrchu vzorku (viz obrázek 3.5). Kruhový tvar interferenčních proužků je způsoben prohnutím referenčního povrchu i vzorku (viz část 5.4.4).



Obrázek 3.7: Měření profilu povrchu pomocí interferometrie nízké koherence. Na obrázku jsou znázorněny naměřené intenzity podél řezu profilem při různých polohách z měřícího zrcadla interferometru. V různých bodech svazku dochází k interferenci při jiných polohách měřícího zrcadla (dle profilu měřeného povrchu). Červeně je vyznačen řez profilem povrchu vypočítaný z naměřené závislosti intenzity na poloze měřícího zrcadla korelační metodou doplněnou o fitování korelace parabolou. Vzorkem je křemíkový wafer s vyleptanou strukturou hlubokou dle provedených měření asi $12,5\ \mu\text{m}$. V místě schodu (tmavý svislý pruh) je patrná interference od obou ploch, což je způsobeno zejména nedokonalou kolimací svazku bílého světla. Z toho důvodu je pozvolné klesání detekováno jako ostrý schod. Signály z některých bodů jsou vykresleny na obrázku 3.8.

3.2. ANALÝZA PROFILU POVRCHŮ POMOCÍ WLI



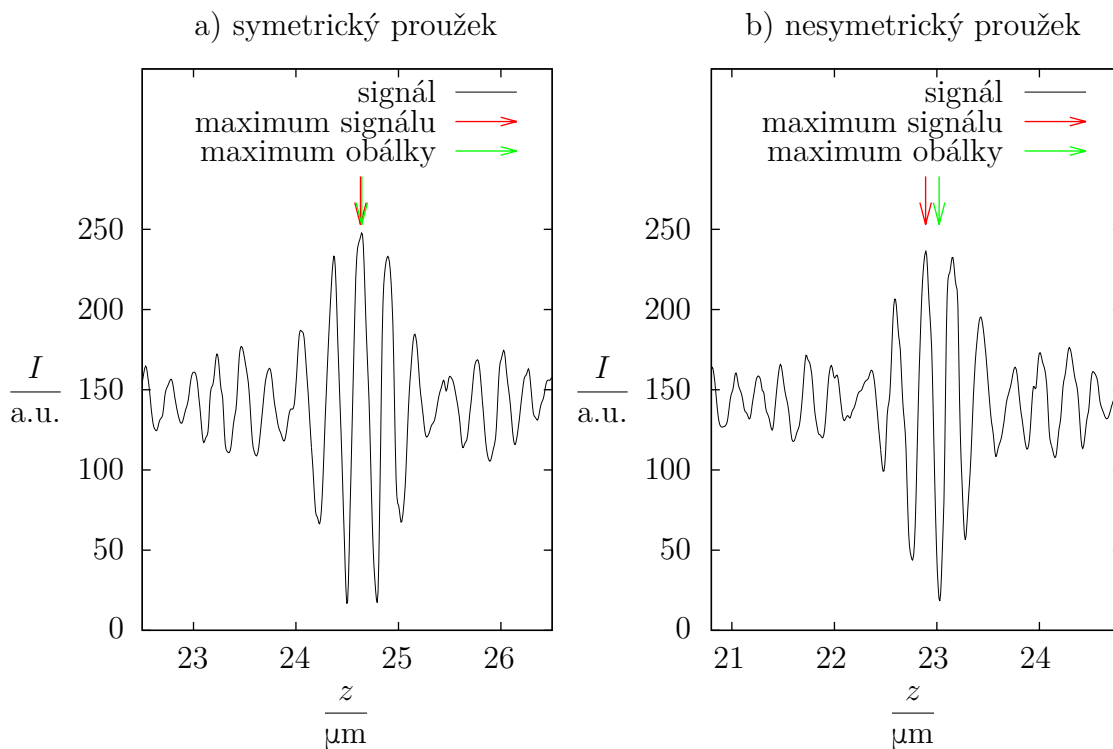
Obrázek 3.8: Příklady naměřených interferogramů (závislost hodnoty pixelu I odpovídající intenzitě na čísle snímku m) z kamery (tedy detekční části pro bílé světlo) a interferenčních signálů z fotodetektoru (závislost napětí U úměrného intenzitě na čísle vzorku m) detekující interferenci laserového záření (graf d). Na grafech a), c) jsou signály z leptané a neleptané části vzorku (křemíkový wafer s vyleptanými strukturami hlubokými asi $12,5\mu\text{m}$). Poté, co z grafu d) určíme závislost změny polohy měřícího zrcadla na čísle snímku oproti poloze, při které bylo měření spuštěno, můžeme po detekci středu interferenčních proužků určit hloubku vyleptané struktury. Na grafu b) je záznam z bodu, který byl na rozhraní leptané a neleptané části vzorku. Vlivem toho, že svazek bílého světla byl mírně divergentní, jsou v tomto bodě proužky na dvou místech odpovídajících oběma rovinám měřeného povrchu (viz obrázek 3.7). Z grafu d) je patrné, že rychlost měřícího zrcadla interferometru se během měření měnila (perioda signálu se mění).

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

Abychom mohli použít jeden interferometr pro bílé i laserové světlo, je třeba svazky z obou zdrojů na vstupu sloučit a na výstupu opět rozdělit. Ke sloučení je možné použít polopropustné zrcadlo (jako je užito v realizované sestavě, viz schéma na obrázku 4.1). Intenzita obou svazků tímto však klesne (záleží na odrazivosti zrcadla). Na výstupu je opět možné použít polopropustné zrcadlo, kterým svazek rozdělíme na část pro detekci interference bílého světla a část pro detekci interference laserového záření, přičemž do obou částí (je-li intenzita jednoho ze zdrojů výrazně vyšší než druhého, stačí do jedné části) vložíme filtry, které eliminují tu část záření, kterou v dané větvi nechceme detekovat.

3.3. Detekce vyváženého stavu Michelsonova interferometru

Při měření profilu povrchu získáme pro každý bod detektoru závislost intenzity na poloze měřicího zrcadla (viz obrázek 3.8), pro zjištění polohy měřeného povrchu v daném bodě je třeba přesně zjistit polohu středu interferenčního proužku, tedy takové místo, pro které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru pro zvolenou vlnovou délku stejné (je-li interferometr ideálně korigován na disperzi, pak při této poloze je rozdíl optických drah ve větvích interferometru nulový pro všechny vlnové délky).



Obrázek 3.9: Různé metody detekce středu interferenčního proužku mohou určit jako střed interferenčního proužku jeho různou část: a) je-li proužek symetrický, maximum signálu splývá s maximem jeho obálky; b) proužek může být vlivem disperze nesymetrický, pak maximum signálu s maximem obálky nespývá.

Metody pro detekci středu interferenčního proužku je možné rozdělit [15] na metody detekující maximum obálky a metody detekující interferenční maximum (popř. i minimum) v blízkosti maxima obálky signálu (viz obrázek 3.9). Polohu středu interferenčního proužku je možné určit i ze spektra naměřeného signálu [16]. V případě, že využíváme de-

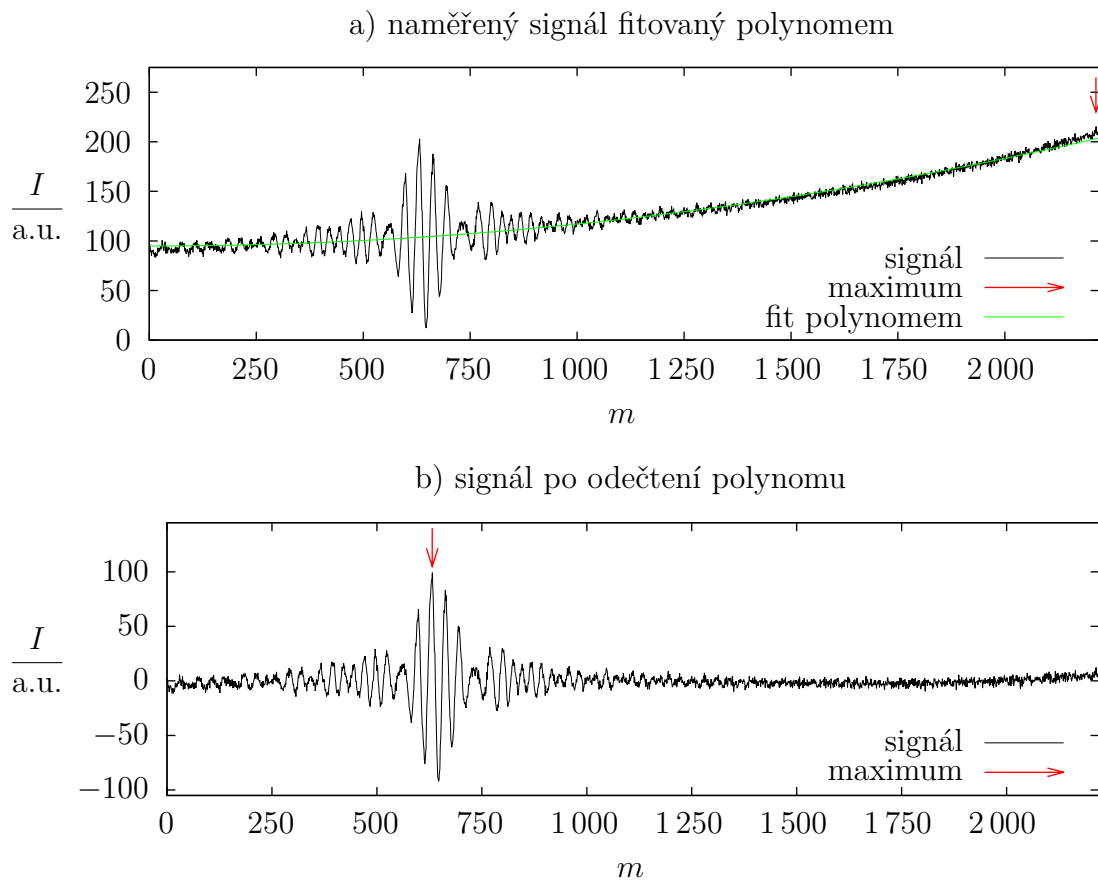
3.3. DETEKCE VYVÁŽENÉHO STAVU MICHELSONOVA INTERFEROMETRU

tektor, který je schopný nezávisle detekovat několik různých vlnových délek (např. barevnou kameru), poloha středu interferenčního proužku může být zjištěna z místa, ve kterém jsou fáze naměřených signálů odpovídajících různým vlnovým délkám shodné [17].

V následující části budou popsány metody, které jsou využitelné v realizované sestavě, tedy metody zakládající se na analýze naměřené závislosti intenzity na poloze měřícího zrcadla (jelikož bude použita černobílá kamera), popř. jejího spektra.

3.3.1. Maximum signálu

V případě, že chceme jen přibližně lokalizovat polohu interferenčního proužku v naměřeném signálu, může dostačovat nalezení globálního maxima hodnoty naměřeného signálu, viz obrázek 3.9.



Obrázek 3.10: Průměrná hodnota intenzity se během měření může měnit. Pak může být při hledání maxima intenzity detekováno jiné místo než hledaný proužek. Problém lze v některých případech odstranit fitováním naměřeného signálu polynomem nízkého stupně a jeho odečtením od naměřeného signálu. Jedná se o modelový příklad, nikoliv data naměřená na realizované sestavě, kde se průměrná hodnota intenzity během měření téměř nemění.

Pokud se průměrná hodnota intenzity během měření výrazně mění (jako na obrázku 3.10), což může nastat v případě posuvu měřícího zrcadla na delší vzdálenosti, pak může být v některém místě intenzita vyšší než je intenzita interferenčního proužku, a tedy dojde k nalezení špatného místa. V tom případě je možné naměřenou závislost intenzity na poloze měřícího zrcadla fitovat přímkou, popř. polynomem nízkého stupně (vždy dle

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

naměřeného signálu), a tuto přímku (popř. polynom) od signálu odečíst, čímž přibližně odfiltrujeme jeho stejnosměrnou složku.

Výhodou metody je rychlost, nevýhodou naopak nižší přesnost. Je možné ji zkombinovat např. s korelační metodou, kdy pomocí maxima signálu je proužek přibližně lokalizován a do korelační metody vstupuje pouze část signálu kolem tohoto přibližně lokalizovaného středu, čímž se v případě dlouhých záznamů může výpočet urychlit, příklad viz tabulka 3.1.

3.3.2. Vážený průměr poloh maxim

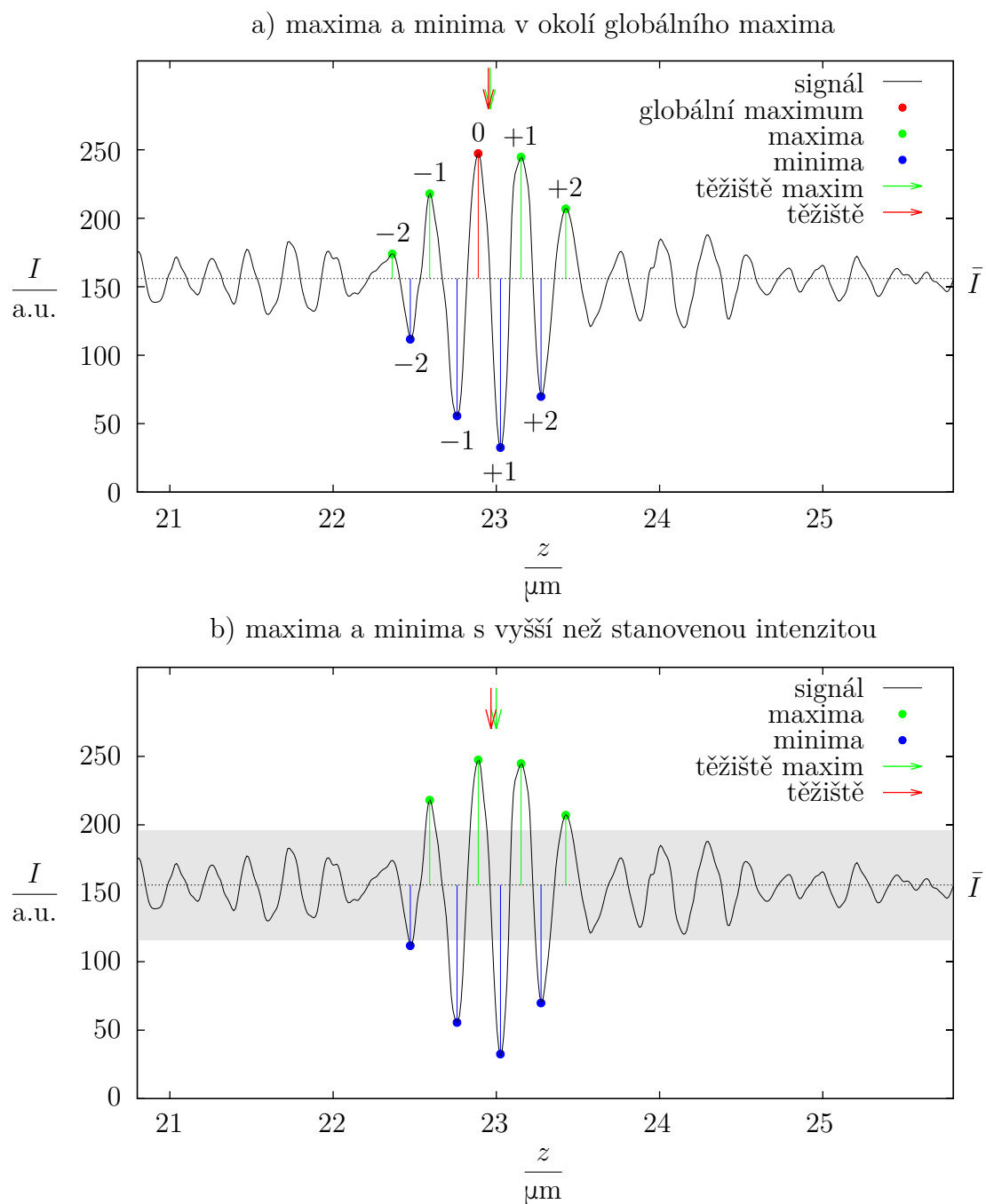
Rozšířením nejjednodušší metody, kterou je detekce maxima signálu, je výpočet váženého průměru poloh maxim, přičemž váhou je jeho intenzita, jde tedy o výpočet polohy těžiště interferogramu (viz obrázek 3.11). Výpočet se týká několika interferenčních maxim v okolí maxima signálu. Je též možné zpracovávat absolutní hodnotu střídavé složky signálu, čímž jsou do výpočtu zahrnuta i minima. Vybereme-li N maxim (popř. i minim) z oblasti v okolí globálního maxima signálu, pak polohu středu interferenčního proužku určíme jako

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^N |I_i - \bar{I}| z_i}{\sum_{i=1}^N |I_i - \bar{I}|}, \quad (3.1)$$

kde I_i je naměřená intenzita i -tého maxima či minima s polohou z_i , a \bar{I} je průměrná hodnota intenzity během záznamu, která bude přibližně odpovídat intenzitě v případě, že je rozdíl optických drah ve větvích interferometru mnohem větší než je koherenční délka zdroje (jejím odečtením tedy dostaneme přibližně střídavou složku signálu). Pro dosažení vyšší přesnosti můžeme místo naměřených poloh a intenzit interferenčních maxim použít pro výpočet těžiště a plochu jednotlivých proužků. [5], [18]

Při použití této metody je nutné nejprve zvolit, která maxima (popř. i minima) do výpočtu zahrneme, což značně ovlivňuje, které místo signálu bude vyhodnoceno jako střed interferenčního proužku. Jestliže vyhledáme globální maximum signálu a zpracováváme maxima (popř. i minima) symetricky kolem něj (obrázek 3.11a), pak většinou je nalezené místo (i přes asymetrii proužku) s tímto maximem téměř totožné, a tedy metoda je neodolná vůči disperzi – je-li intenzita globálního maxima téměř shodná s intenzitou jiného maxima, pak dle vzorkování a šumu může dojít k detekci jednoho či druhého maxima (následkem čehož bude rovný povrch detekován jakožto schody, viz obrázek 3.14a). Druhou možností je zvolit minimální intenzitu maxim (v poměru k intenzitě globálního maxima, viz obrázek 3.11b), v tom případě opět velmi závisí na šumu, která maxima budou těsně nad vybranou hranicí intenzity, a tedy budou zahrnuta do výpočtu, a která ne. Tato metoda má tedy velmi malou odolnost vůči šumu.

3.3. DETEKCE VYVÁŽENÉHO STAVU MICHELSONOVA INTERFEROMETRU



Obrázek 3.11: Střed interferenčního proužku můžeme najít jako vážený průměr poloh maxim (popř. i minim), přičemž váhou je intenzita maxima. Maxima, která do výpočtu zahrneme, je možné vybrat dvojím způsobem: a) najít globální maximum signálu a zpracovávat maxima (popř. i minima) symetricky kolem něj; b) zvolit hranici intenzity, nad kterou budou maxima (popř. i minima) zahrnuta do výpočtu.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

3.3.3. Korelační metoda

Korelační metoda spočívá v porovnání naměřeného signálu se signálem modelovým, jehož střed známe. Je možné porovnávat samotný signál s modelem, popř. absolutní hodnotu střídavé složky signálu a absolutní hodnotu střídavé složky modelu. V druhém případě se vypočítá vzájemná korelace absolutní hodnoty naměřeného signálu $I(m)$, od kterého je přibližně odfiltrována jeho stejnosměrná složka odečtením průměrné intenzity během záznamu \bar{I} , a modelového signálu $I_m(m)$ (jehož stejnosměrná složka je nulová) jako

$$\left(|I - \bar{I}| \star |I_m| \right) (\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} |I(m) - \bar{I}| |I_m(m + \tau)| ,$$

kde N je počet vzorků. \bar{I} (průměrná hodnota intenzity během záznamu) přibližně odpovídá intenzitě v případě, že je rozdíl optických drah ve větvích interferometru mnohem větší než je koherenční délka zdroje. Hledá se poloha maxima, tedy takové posunutí modelového signálu, při kterém se nejvíce podobá signálu naměřenému. [5], [18]

Protože se vzájemná korelace počítá pro diskrétní body, nemůžeme bez dalších úprav algoritmu polohu naměřit jinde než v polohách, ve kterých byly pořízeny snímky, rozlišení je tedy rovno vzdálenosti, kterou mezi dvěma po sobě jdoucími snímky urazí měřící zrcadlo. Výpočet v diskrétních bodech zároveň znamená pro použití korelační metody požadavek, aby mezi každými dvěma po sobě následujícími vzorky měřící zrcadlo interferometru urazilo stejnou vzdálenost.

Pro použití korelační metody potřebujeme modelový signál. Je-li spektrum zdroje Gaussovou funkcí frekvence, pak se závislost intenzity na poloze měřícího zrcadla z dá vyjádřit jako

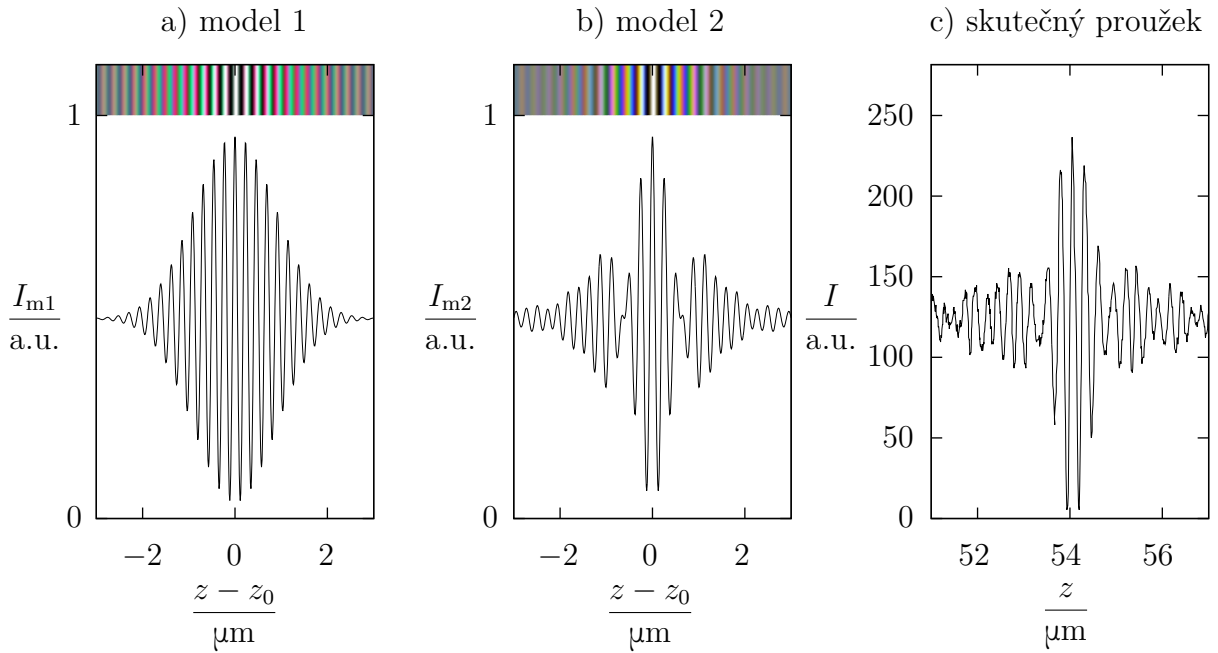
$$I(z) = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[-\frac{(z - z_0)^2}{l_c^2} \right] \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda_0} (z - z_0) \right] \right\} , \quad (3.2)$$

kde l_c je koherenční délka zdroje, λ_0 je jeho střední vlnová délka, z_0 je poloha měřícího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné, a I_0 je intenzita v případě, že rozdíl optických drah v obou větvích interferometru je mnohem větší než koherenční délka zdroje. [18] Tento model (použitý v [5]) je znázorněn na obrázku 3.12a a bude dále označován jako *model 1*). Zdroje však mají často spektrum od tohoto modelového značně odlišné, a tak i interferogram se od tohoto modelu liší (viz obrázek 3.12c). Proto byl vytvořen model proužku vypočítaný na základě naměřeného spektra zdroje (viz obrázek 3.12b, dále označováný jako *model 2*). Model využívá představu, že interferogram pro bílé světlo vznikne jako součet intenzit interferogramů pro koherentní záření (viz obrázek 3.1), půjde tedy o součet kosinů násobených spektrální hustotou příslušné vlnové délky. Změříme-li spektrální hustotu $\mathcal{S}(\lambda)$ (tj. při měření spektrometrem intenzitu různých diskrétních vlnových délek λ), pak se modelová závislost intenzity na poloze měřícího zrcadla dá vyjádřit jako

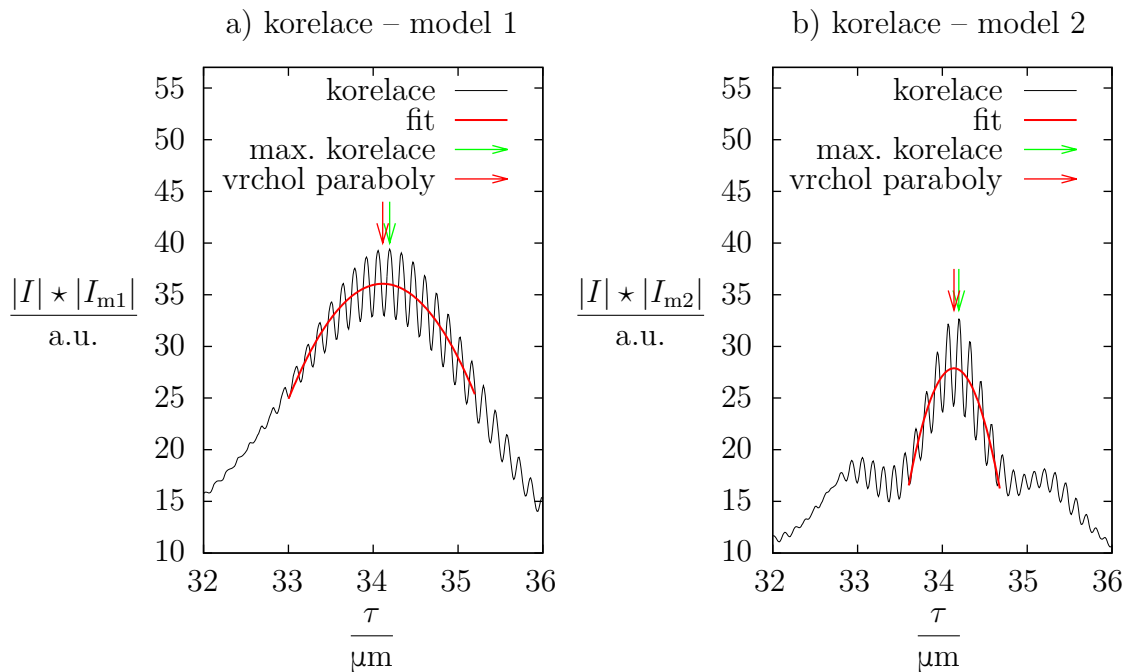
$$I(z) = I_0 + \sum_{\lambda} \mathcal{S}(\lambda) \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} (z - z_0) \right] , \quad (3.3)$$

kde z_0 je poloha měřícího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné (z_0 volíme ve středu intervalu, na kterém model počítáme), a I_0 je konstanta (volíme $I_0 = 0$, čímž dostaneme pouze střídavou složku modelového signálu). Tento navržený model proužku se reálnému proužku při použití bílé LED jako zdroje světla podobá více (viz obrázek 3.12) a z obrázku 3.13 je patrné, že maximum vzájemné korelace absolutní hodnoty modelového a naměřeného signálu je ostřejší než v případě modelu 1, a tedy v případě šumu by měla být detekce přesnější, což bylo ověřeno měřením (viz tabulka 3.2).

3.3. DETEKCE VYVÁŽENÉHO STAVU MICHELSONOVA INTERFEROMETRU



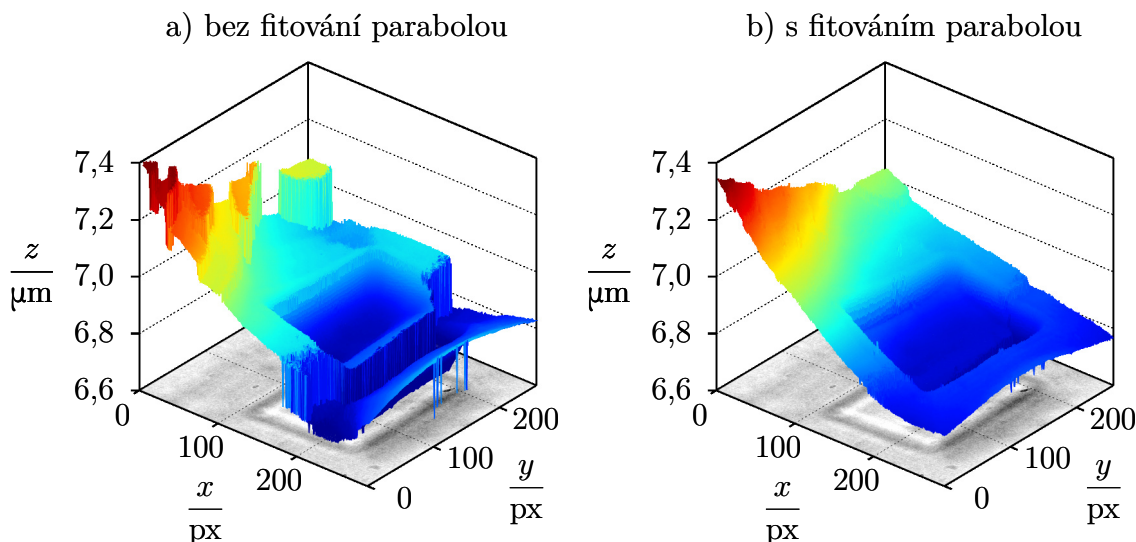
Obrázek 3.12: Srovnání dvou modelů se skutečným proužkem: a) původní model dle rovnice (3.2) (dle [5]), b) model vytvořený na základě spektra LED dle rovnice (3.3), c) skutečný naměřený interferenční proužek.



Obrázek 3.13: Vzájemná korelace absolutní hodnoty střídavé složky naměřeného signálu a absolutní hodnoty střídavé složky modelového proužku: a) použit původní model z [5] (obrázek 3.12a), b) model sestavený na základě měření spektra LED (obrázek 3.12b). Část grafu je proložena parabolou, z polohy jejíhož vrcholu je možné lépe určit polohu středu interferenčního proužku v případě neoptimálního nastavení kompenzační desky (viz obrázek 3.14).

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

V případě, že kompenzační deska není nastavena pro celou snímanou plochu optimálně, kvůli disperzi neexistuje taková poloha měřicího zrcadla, aby byla optická dráha v obou větvích interferometru (pro každý bod svazku) pro všechny vlnové délky stejná, což způsobí asymetrii proužku (obrázek 3.9) a posunutí místa, kde je kontrast interferenčních proužků maximální (tedy maxima obálky) mezi lokální maxima signálu. Korelační metoda pak obvykle najde nejbližší lokální maximum signálu či absolutní hodnoty jeho střídavé složky. V případě planoparalelního děliče a kompenzační desky to znamená pouze posun všech detekovaných poloh o stejnou vzdálenost, což nezpůsobí při měření profilu povrchu žádný problém. Jsou-li však dělič a kompenzační deska klínové, pak v případě neoptimálně nastavené kompenzační desky je tvar proužku v různých místech svazku různý (to je patrné např. na obrázku 3.8). To je možné si pro malé rozdíly optických drah pro různé vlnové délky představit jakoby se obálka signálu lineárně posouvala, čímž dojde k tomu, že se hodnota maxima některých proužků snižuje a jiných zvyšuje. Korelační metoda pak rovinný povrch určí jako schody o výšce v případě použité LED asi 110 nm (viz obrázek 3.14a). Proto byla metoda upravena. Část vypočítané vzájemné korelace absolutní hodnoty střídavé složky naměřeného signálu a absolutní hodnoty střídavé složky modelového proužku blízko maxima je proložena parabolou (viz obrázek 3.13) a detekujeme polohu vrcholu této paraboly. Je-li proužek symetrický, pak poloha vrcholu paraboly splývá s polohou maxima vzájemné korelace. V opačném případě je parabola posunuta tím směrem, kterým je posunuta obálka. Po provedení této úpravy je již rovina detekována jako rovina (viz obrázek 3.14b), ačkoliv nakloněná (což je možné odstranit proložení roviny a odečtením od naměřené plochy). Úprava zvyšuje výpočetní náročnost metody, neboť je třeba provést lineární regresi, avšak zvyšuje rozlišení ve směru kolmém na optickou osu svazku a částečně odstraňuje problém s disperzí. Její použití tedy závisí na požadovaném rozlišení.



Obrázek 3.14: Povrch vypočítaný pomocí korelační metody a) bez fitování, b) s fitováním vzájemné korelace parabolou v případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky. Při použití této úpravy je korelační metoda odolná vůči disperzi. Povrchem je křemíková deska, na které byla vyleptána struktura hluboká na polovině asi 100 nm, na druhé polovině asi 50 nm.

Nevýhodou metody je rychlost v případě, že je záznam mnohem delší než je šířka proužku. Výpočet je možné v případě, že se průměrná hodnota intenzity během měření

3.3. DETEKCE VYVÁŽENÉHO STAVU MICHELSONOVA INTERFEROMETRU

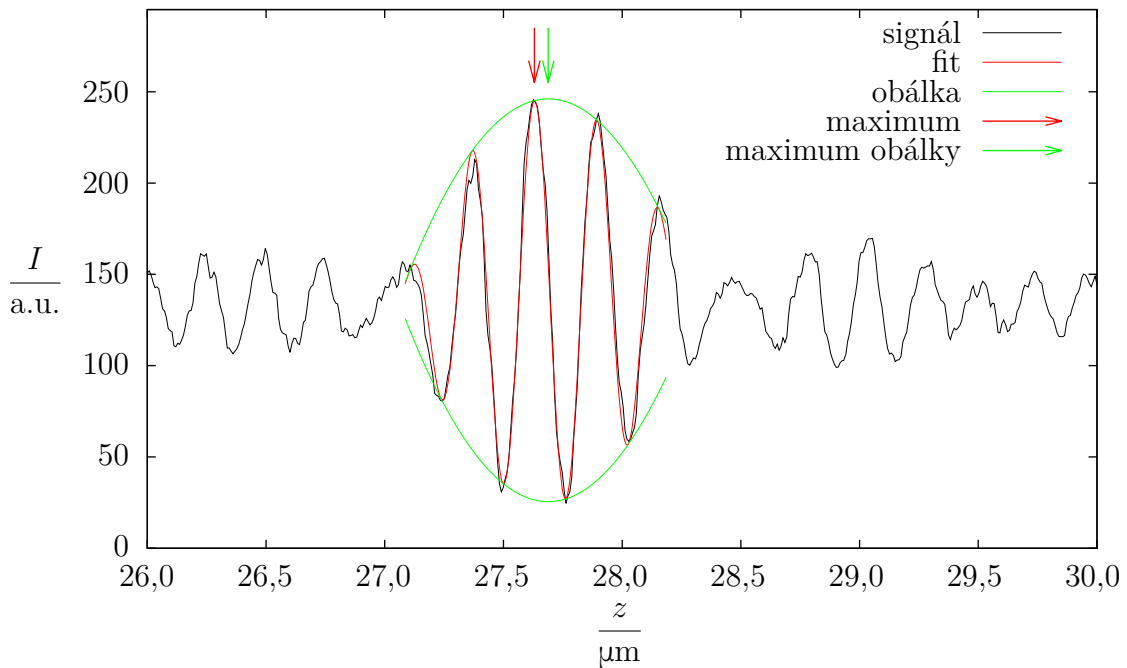
příliš nemění (viz obrázek 3.10) a poměr signál/šum je dostatečný, urychlit přibližným nalezením středu proužku jakožto místa, kde má absolutní hodnota střídavé složky signálu maximum, a zpracováním pouze malého okolí tohoto místa.

3.3.4. Fitování proužku

Závislost intenzity I na poloze z měřícího zrcadla interferometru můžeme v okolí středu interferenčního proužku vyjádřit přibližně jako

$$I(z) \approx I_0 + (az^2 + bz + c) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z - \varphi\right), \quad (3.4)$$

kde I_0 , a , b , c a φ jsou neznámé reálné konstanty a λ_0 je střední vlnová délka zdroje, kterou můžeme pro daný zdroj změřit přímo na Michelsonově interferometru jakožto dvojnásobek střední vlnové délky naměřených interferenčních proužků nebo vypočítat ze spektra. Tato aproximace bude přibližně platit pro okolí maxima signálu (viz obrázek 3.15), jehož velikost je třeba před zahájením výpočtu zjistit. Počet proužků, které můžeme do výpočtu zahrnout je závislý na zdroji světla a je možné jej zjistit porovnáním naměřených dat s nafitovanou funkcí. [15]



Obrázek 3.15: Naměřený signál fitovaný modelovou funkcí dle rovnice (3.4) s vyznačenými dvěma polohami, které lze označit za střed interferenčního proužku – poloha maxima fitované obálky a poloha maxima fitovaného signálu, které je maximum obálky nejbližší. V případě symetrického proužku tyto polohy splývají (viz obrázek 3.9).

Označme $A_1 = a \cos \varphi$, $A_2 = b \cos \varphi$, $A_3 = c \cos \varphi$, $B_1 = a \sin \varphi$, $B_2 = b \sin \varphi$, $B_3 = c \sin \varphi$. S využitím vztahu pro kosinus rozdílu pak dostaneme

$$I(z) \approx I_0 + A_1 z^2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right) + A_2 z \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right) + A_3 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right) + B_1 z^2 \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right) + B_2 z \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right) + B_3 \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}z\right),$$

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

tedy rovnici, která je lineární vzhledem k I_0 , A_i , B_i , kde $i \in \{1; 2; 3\}$, pro jejich zjištění tedy můžeme použít lineární regresi. Jelikož se rovnice bude řešit numericky, je vhodné před započítáním výpočtu posunout a škálovat osu z tak, aby interval, na kterém se bude počítat, byl $\langle -1; 1 \rangle$. Z nalezených hodnot I_0 , A_i , B_i pak můžeme určit původní konstanty jako

$$\varphi = \arctg \frac{B_1}{A_1}, \quad a = \frac{A_1}{\cos \varphi}, \quad b = \frac{A_2}{\cos \varphi}, \quad c = \frac{A_3}{\cos \varphi}.$$

Polohu středu interferenčního proužku pak můžeme určit jako polohu maxima fitované parabolické obálky jako

$$z_m = -\frac{b}{2a}.$$

V případě, že máme optimálně nastavenou kompenzační desku a nedocházelo-li by ke vzniku schodů jako na obrázku 3.14a, pak je přesnější detekovat polohu nejbližšího maxima intenzity, což určíme jako

$$z_0 = \frac{\lambda_0}{4\pi} \left[\varphi + 2\pi \operatorname{int} \left(\frac{4\pi z_m - \varphi}{2\pi} \right) \right], \quad (3.5)$$

kde $\operatorname{int} x$ je dolní celá část x pro $x \geq 0$ a horní celá část x pro $x < 0$. [15]

Vzhledem k tomu, že algoritmus využívá pouze hledání maxima signálu a lineární regresi, je rychlý; protože proužek je fitován, je také méně náchylný na šum. V případě, že analyzujeme pouze obálku, pak nedochází v případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky ke vzniku schodů jako na obrázku 3.14a, avšak detekovaná rovina bude nakloněná (podobně jako na obrázku 3.14b). Nevýhodou je naopak nutnost zjištění střední vlnové délky zdroje a velikosti okolí maxima, které je možné aproximovat dle vztahu (3.4). Pro daný zdroj jde však o konstanty, takže je třeba je zjistit pouze jednou.

3.3.5. Analýza ve frekvenční oblasti

Zdroj bílého světla je možné si představit jako mnoho vzájemně nekoherentních zdrojů monochromatického záření různých vlnových délek. Interference v případě bílého světla pak znamená, že pro všechny vlnové délky sečteme intenzity, které vytvoří interference od každého z takových zdrojů (v případě diskrétních vlnových délek dle rovnice (3.3)), viz obrázek 3.1.

V ideálním interferometru, který je korigován na disperzi, platí mezi fází φ interferenčního signálu a rozdílem optických drah z v jeho větvích vztah

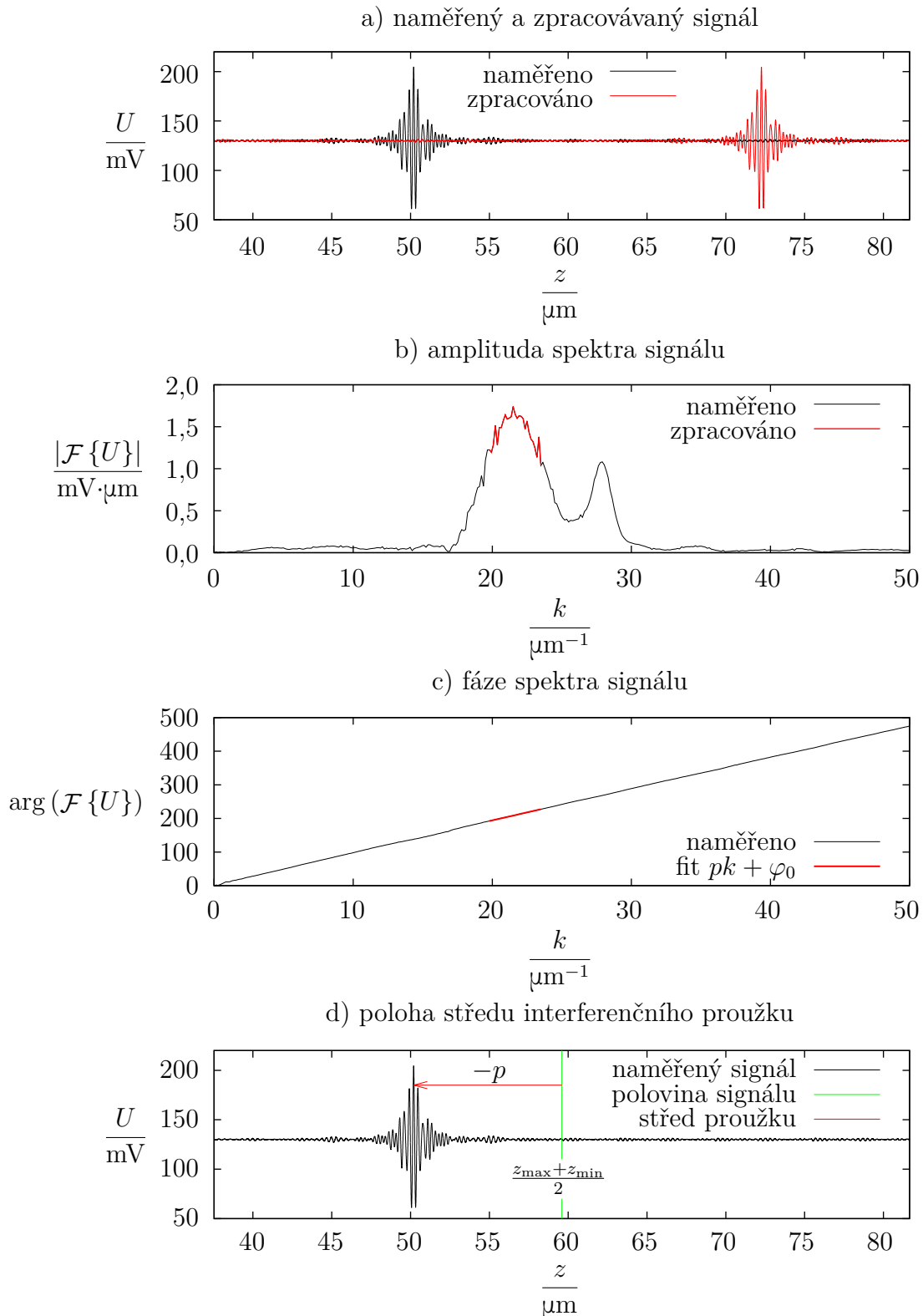
$$\varphi = kz,$$

kde $k = 4\pi/\lambda_0$ je prostorová frekvence, přičemž λ_0 je střední vlnová délka zdroje. Pro změnu fáze φ v závislosti na prostorové frekvenci k v malém okolí prostorové frekvence k_0 odpovídající střední vlnové délce λ_0 zdroje platí

$$\left. \frac{d\varphi}{dk} \right|_{k=k_0} = z.$$

Závislost $\varphi(k)$ můžeme získat z naměřeného signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace (viz obrázek 3.16). Ze všech prostorových frekvencí k vybereme malý interval, který obsahuje frekvence, jejichž amplituda je nejvyšší (ty budou odpovídat spektru zdroje), a odpovídající část závislosti $\varphi(k)$ proložíme přímkou, z jejíž směrnice již dokážeme polohu středu proužku zjistit. [5], [16]

3.3. DETEKCE VYVÁŽENÉHO STAVU MICHELSONOVA INTERFEROMETRU



Obrázek 3.16: Znázornění principu metody FDA. Z periodického pokračování signálu (napětí na fotodetektoru úměrné intenzitě v závislosti na poloze měřícího zrcadla) je vybrána jeho jiná část stejné délky (je zaměněna první a druhá polovina signálu), poté je vypočítána jeho Fourierova transformace. Část závislosti fáze spektra na prostorové frekvenci k je poté fitována přímkou, jejíž směrnice určuje vzdálenost středu interferenčního proužku od středu původního signálu.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

Při implementaci této metody byl nejprve použit kód z [5]. Ten počítá Fourierovu transformaci přímo z naměřeného signálu a zjistí směrnici p závislosti fáze na prostorové frekvenci. Je-li směrnice p záporná, pak vzdálenost proužku od začátku měření je $|p|$ (proužek je v první polovině naměřeného signálu), je-li směrnice kladná, pak p určuje vzdálenost proužku od konce měření (proužek je v druhé polovině naměřeného signálu). Z toho plyne, že závislost směrnice p na poloze proužku v naměřeném signálu musí být nespojitá pro polohu proužku odpovídající situaci, kdy je symetrický proužek uprostřed naměřeného signálu. Pak je signál sudou funkcí, její Fourierova transformace je ryze reálná, fáze identicky rovna nule, a tedy její směrnice nulová. Skutečný signál není nikdy dokonale symetrický, a tedy směrnice nevyjde přesně nulová, avšak malé kladné či záporné číslo, a tedy proužek není detekován uprostřed signálu, nýbrž v blízkosti jeho okraje (v závislosti na znaménku směrnice p). Tento problém byl pozorován jak na reálných signálech, tak na modelovém signálu. Kód byl proto upraven, před začátkem výpočtu je zaměněna první a druhá polovina naměřeného signálu (viz obrázek 3.16a), čímž pro zpracování vybereme jinou část periodického pokračování signálu. Závislost směrnice závislosti fáze na prostorové frekvenci na poloze proužku v signálu je pak spojitá (nespojitosť je pouze pro proužek v těsné blízkosti okraje signálu, což ovšem znamená, že jej část chybí, a tedy ani nemůže být správně detekován) a její záporně vzatá hodnota je přímo rovna vzdálenosti středu interferenčního proužku od středu signálu.

Výhodou metody je, vzhledem k tomu, že se nepracuje přímo se signálem, ale jeho spektrem, velká odolnost vůči šumu.

Nevýhodou naopak je, že je nutné, aby mezi jednotlivými snímky měřící zrcadlo urazilo vždy stejnou vzdálenost (k výpočtu používáme FFT). Algoritmus z [5] na to spoléhá, avšak během praktického měření se ukázalo, že tento požadavek splněn není, což velmi zkresluje výsledky získané pomocí této metody. Proto byl algoritmus upraven a před původní výpočet přidána interpolace naměřených hodnot kubickým splinem, čímž se přibližně získají hodnoty, které bychom naměřili, kdyby byl uvedený požadavek splněn.

Proužek není metodou nalezen v případě, že záznam obsahuje dva interferenční proužky (na měřených vzorcích např. v blízkosti hran, viz obrázek 3.8b), ačkoliv jiné metody naleznou vždy jeden z nich. V tomto případě je často proužek detekován mezi místy, kde se skutečně proužky nachází (viz obrázek 5.10), díky čemuž se v některých případech detekovaný povrch může skutečnému podobat více (jako na obrázku 5.10), v jiných bychom ovšem mohli detekovat povrch v místech, kde ve skutečnosti není.

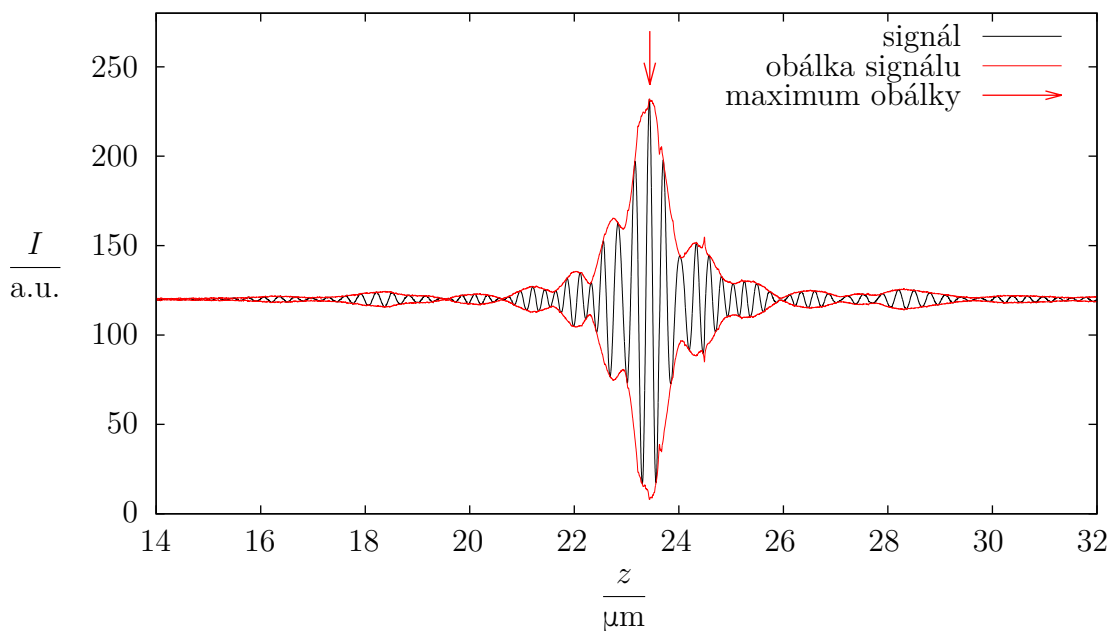
3.3.6. Maximum obálky

Obálku signálu je možné najít jakožto modul analytického signálu

$$I_a = I + i \mathcal{H} \{I\},$$

kde I je střídavá složka naměřeného interferenčního signálu (tj. závislost intenzity na poloze měřícího zrcadla, od které byla odečtena její průměrná hodnota) a $\mathcal{H} \{I\}$ je jeho Hilbertova transformace, viz obrázek 3.17. Polohu středu interferenčního proužku pak určíme jako polohu maxima této obálky. [19]

Další možností výpočtu obálky je posouvání fáze, které ale klade požadavky na vzdálenost, kterou urazí měřící zrcadlo mezi dvěma snímky (měla by odpovídat změně fáze o $\pi/2$) [20]. Tento požadavek však v realizované sestavě nemůže být bez modifikací splněn.



Obrázek 3.17: Obálka naměřeného signálu vypočítaná pomocí Hilbertovy transformace. Za střed interferenčního proužku je pak možné označit místo, kde nabývá obálka maxima.

3.4. Detekce středu proužku v prostředí MATLAB

Pro výpočet středu interferenčního proužku byly vytvořeny následující funkce pro prostředí MATLAB (viz přílohy):

- `wli_weight_center` – vypočítá střed interferenčního proužku jakožto vážený průměr poloh maxim a minim, dle rovnice (3.1).
- `wli_corr_gauss` – výpočet pomocí korelační metody za použití modelu 1. Základem je kód z [5], přičemž byl pro snazší použití přepsán do podoby funkce, jejímž vstupem jsou parametry zdroje světla (střední vlnová délka a koherenční délka), naměřené intenzity a polohy měřícího zrcadla a výstupem polohy středů interferenčních proužků. Algoritmus byl doplněn o možnost najít maximum signálu a vzájemnou korelaci počítat pouze pro jeho okolí, čímž se výpočet v případě záznamů mnohem delších než je šířka proužku urychlí.
- `wli_corr_gauss_fit` – jako předchozí, navíc přidává fitování vzájemné korelace parabolou, čímž částečně eliminuje chyby vzniklé v případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky (viz obrázek 3.14), tedy přidává odolnost vůči disperzi.
- `wli_corr_spectrum` – používá pro výpočet vzájemné korelace model vypočítaný ze změřeného spektra zdroje, které je načteno ze souboru.
- `wli_corr_spectrum_fit` – jako předchozí, navíc přidává fitování vzájemné korelace parabolou.
- `wli_qfit` – provádí fitování části proužku v okolí maxima signálu pomocí modelové funkce dle rovnice (3.4) pro zadanou střední vlnovou délku a okolí maxima, polohu určí dle vztahu (3.5).
- `wli_qfit_env` – stejné jako předchozí, pouze polohu určí jako maximum fitované parabolické obálky, čímž za cenu méně přesné detekce odstraní problém s detekcí v případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky (viz obrázek 3.14), přidává tedy odolnost vůči disperzi.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

- `wli_fda` – výpočet pomocí FDA. Kód byl převzat z [5] a přepsán do podoby funkce. Původní algoritmus spoléhal na to, že vzdálenost uražená měřicím zrcadlem mezi snímky je během měření přibližně konstantní. Pokud však měřicí zrcadlo v průběhu měření mění velikost rychlosti, pak byl proužek detekován v místě, kde by se měřicí zrcadlo nacházelo, pokud by se pohybovalo průměrnou rychlostí během měření. Tento problém byl odstraněn. Také byl odstraněn problém, kdy nebyl proužek detekován, pokud byl v blízkosti středu signálu.
- `wli_fda_interp` – jako předchozí, přičemž před zahájením výpočtu jsou naměřené body kubickým splinem interpolovány na novou osu, která je ekvidistantní. Tím se též dá vyřešit problém s detekcí v případě zrychlujícího či zpomalujícího měřicího zrcadla během měření, avšak za cenu vyšší výpočetní náročnosti.
- `wli_env_hilb` – počítá střed interferenčního proužku jakožto polohu maxima obálky vypočítané pomocí Hilbertovy transformace.

Vstupem pro výpočet může být vektor (v případě, že chceme najít proužek pouze pro jeden bod detektoru), dvourozměrná matice (pro lineární detektory) či trojrozměrná matice (pro dvourozměrné detektory, např. kameru), výstupem je pak podle rozměru vstupu číslo, vektor či matice obsahující polohy měřicího zrcadla odpovídající středům interferenčních proužků. V případě, že probíhá detekce na více bodech, pak při dostupnosti Parallel Computing Toolbox je pro urychlení využito paralelní zpracování na více procesorech.

Vytvořené funkce pro snazší použití obsahují nápovědu. Změnou hodnoty jedné proměnné v souboru funkce je možné zapnout režim ladění, při kterém jsou vypisovány některé důležité vypočítané hodnoty a též jsou vykresleny grafy, pomocí kterých je možné ověřit funkčnost metody pro zadané vstupní hodnoty.

3.5. Srovnání metod detekce středu proužku

Zpracování naměřených signálů může být v případě velkého rozlišení snímače a dlouhých záznamů časově náročné, proto může být výhodné zvolit detekční metodu, která je méně výpočetně náročná. Zejména v případě použití klínového děliče a kompenzační desky pak při měření profilu povrchů požadujeme, aby byla metoda odolná vůči disperzi a nedocházelo vlivem neoptimálního nastavení kompenzační desky ke vzniku schodů v detekovaném povrchu jako na obrázku 3.14a. Odolnost vůči disperzi též znamená možnost použít různé materiály ve větvích interferometru bez výrazného zhoršení rozlišení. Jestliže je měřeno plochou rovina, pak by měla být detekována jako rovina. Proto bylo na základě několika měření provedeno srovnání metod popsanych v části 3.3 podle těchto tří kritérií.

Protože při měření profilu povrchů měříme relativně (nevztahujeme naměřený profil povrchu k žádnému bodu), obvykle není důležité přesné místo signálu, které metoda detekuje, jestliže toto místo dokáže najít opakovaně. Posune-li se proužek v signálu o nějakou vzdálenost, pak metoda musí najít místo posunuté o tutéž vzdálenost. Z toho důvodu nemá smysl vzájemně porovnávat polohy středu proužku určené jednotlivými metodami.

3.5.1. Výpočetní náročnost metod

Bylo provedeno srovnání doby výpočtu pomocí vytvořených funkcí popsanych v části 3.4. Pro dvě různá měření byl spuštěn výpočet postupně pomocí všech funkcí. Obě měření byla zpracovávána v plném rozlišení kamery 1 024 px × 768 px. Pro korelaci a hledání maxima obálky byl výpočet proveden nejprve pro celý signál a následně pouze pro okolí globálního maxima signálu (1,5 μm na obě strany od maxima). Naměřený čas je čas celkový, tedy

3.5. SROVNÁNÍ METOD DETEKCE STŘEDU PROUŽKU

součet času hledání maxima a následného vyhodnocování. Byl též změřen samotný čas hledání maxima, jehož odečtením od naměřené hodnoty je možné zjistit i čas samotného výpočtu korelace, Hilbertovy transformace či lineární regrese (prvním krokem metody fitování proužku je nalezení maxima).

Výpočet probíhal v prostředí MATLAB 2012b (64 bitová verze) na osmijádrovém procesoru AMD FX-8320. Výpočty byly provedeny nejprve na jednom jádře, pak pomocí Parallel Computing Toolbox na všech osmi jádrech. Naměřené doby zpracování jsou uvedeny v tabulce 3.1. Všechny výpočty byly opakovány dvakrát a uveden byl vždy nižší čas z obou naměřených.

Metoda fitování proužku je uvedena pouze jednou (ačkoliv má dvě varianty), protože výpočet polohy u jejích variant se liší jen velmi málo a naměřené doby proto byly stejné.

Tabulka 3.1: Srovnání doby zpracování naměřených dat implementovaných metod pro detekci středu interferenčního proužku pro dvě různá měření. Výpočet probíhal nejprve na jednom jádře, pak paralelně na osmi jádrech (časy označeny indexem p).

počet snímků	2 266		958	
uražená vzdálenost	24,62 μm		8,84 μm	
metoda	$\frac{t_1}{\text{s}}$	$\frac{t_{1p}}{\text{s}}$	$\frac{t_2}{\text{s}}$	$\frac{t_{2p}}{\text{s}}$
maximum signálu	103	25	134	16
těžiště maxim	1 030	184	230	43
korelace, model 1	967	160	543	91
korelace, model 1, okolí maxima	475	85	602	99
korelace, model 1, fit	1 665	297	1 217	219
korelace, model 1, fit, okolí maxima	1 115	197	1 244	217
korelace, model 2	969	158	542	97
korelace, model 2, okolí maxima	476	85	603	98
korelace, model 2, fit	1 662	297	1 219	215
korelace, model 2, fit, okolí maxima	1 114	197	1 247	213
fitování proužku	157	33	203	27
FDA	1 144	197	1 011	169
FDA, interpolace	1 809	298	1 374	219
maximum obálky	522	83	327	52
maximum obálky, okolí maxima	281	51	295	42

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejrychlejší metoda je fitování části naměřeného signálu modelem. Pokud by vzdálenost uražená měřicím zrcadlem mezi snímky byla vždy konstantní, pak bychom navíc mohli některé matice pro lineární regresi počítat pouze jednou [15] a použít je následně pro všechny body. To však znamená, že je třeba, aby rychlost vzorkování byla konstantní a aby se měřicí zrcadlo pohybovalo konstantní rychlostí, což nemusí být vždy splněno (a ani jedna z těchto podmínek během provedených měření splněna nebyla), proto je každý bod zpracováván odděleně i za cenu mírného zpomalení.

V případě korelační metody fitování vzájemné korelace parabolou detekci značně zpomaluje. Jestliže se omezíme na výpočet vzájemné korelace pouze na okolí maxima signálu, pak se v případě dlouhého signálu doba zpracování sníží, je-li signál krátký vzhledem k délce proužku, pak se doba zpracování může naopak zvýšit.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

Použití paralelního zpracování výpočet urychlí, nicméně ne tolikrát, kolik je počet použitých jader procesoru (tedy 8krát), ale dle metody asi 5krát až 6krát, je zde tedy pravděpodobně ještě prostor pro další optimalizaci.

3.5.2. Přesnost detekce rovinného zrcadla

Pokud detekční metody fungují spolehlivě, pak by měly rovinu detekovat jako rovinu. Kompenzační deska byla nastavena tak, že ve vybraných, po celé ploše snímače kamery rovnoměrně rozmístěných bodech, byl interferenční proužek symetrický, aby měření nebyla ovlivněna špatným nastavením kompenzační desky. Poté byla provedena sada měření při různých rychlostech měřícího zrcadla, při kterých v obou větvích interferometru byla zrcadla Thorlabs BB2-E02 s rovinností $\lambda/10$ na vlnové délce $\lambda = 633 \text{ nm}$, přičemž byla detekována jen jejich malá část odpovídající velikosti snímače kamery (tedy oblast o ploše asi $4,76 \text{ mm} \times 3,57 \text{ mm}$), a naměřená data zpracována pomocí metod popsanych v části 3.3. Naměřeným povrchem byla proložena rovina a od naměřených hodnot odečtena. Pokud by byla obě zrcadla dokonale rovinná a detekční metody dokonalé, pak bychom měli dostat ve všech bodech nulovou hodnotu. Pro naměřené povrchy byla vypočítána střední aritmetická úchylnka povrchu

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i|, \quad (3.6)$$

kde n je počet měřených bodů povrchu a h_i je naměřená úchylnka od ideální polohy, což v tomto případě je úchylnka od roviny $h = 0$, tedy přímo naměřená poloha povrchu v i -tém bodě. Měření bylo provedeno vždy pětkrát a byly vypočítány průměrné hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Hodnoty střední aritmetické úchylnky povrchu pro různé rychlosti měřícího zrcadla vypočítané dle rovnice (3.6) z povrchů detekovaných pomocí různých metod detekce středu interferenčního proužku. Jedná se vždy o průměr z pěti měření.

vzdálenost vzorků/nm	0,9	1,8	4,7	10,8	21,9	29,7	50,5
vzorků na periodu	130,4	65,6	25,4	11,2	5,5	4,0	2,4
metoda	$\frac{Ra}{\text{nm}}$						
maximum signálu	18,6	15,7	18,2	19,9	27,8	38,5	65,2
těžiště maxim	5,8	3,8	18,8	20,2	54,5	27,5	32,8
korelace, model 1	17,0	2,0	17,7	3,7	42,2	52,0	121,1
korelace, model 1, fit	3,4	2,6	5,6	6,1	14,1	10,3	12,1
korelace, model 2	1,6	1,7	2,0	2,8	4,2	4,4	11,3
korelace, model 2, fit	3,1	1,9	2,4	3,3	4,3	7,0	8,3
fitování proužku, obálka	2,3	2,3	3,2	2,7	13,5	9,1	18,1
fitování proužku, maxima	1,6	1,9	1,9	1,6	10,5	22,7	29,9
FDA	4,5	2,0	5,1	3,0	5,2	43,9	68,3
FDA, interpolace	2,8	2,5	3,3	4,0	6,3	5,4	7,5
maximum obálky	55,9	49,2	34,2	27,6	34,8	25,7	26,7

3.5. SROVNÁNÍ METOD DETEKCE STŘEDU PROUŽKU

Z hodnot vypočítaných z naměřených dat vyplývá, že v případě korelační metody je vhodné použít model vypočítaný ze spektra zdroje (model 2), tedy model, který se skutečnému proužku více podobá (viz obrázek 3.12). Použití fitování vzájemné korelace parabolou má z hlediska přesnosti význam při vyšší rychlosti měřicího zrcadla, kdy pro dokonalé srovnání naměřeného a modelového proužku není změřeno dostatečné množství bodů.

Výpočet váženého průměru poloh maxim zde dle očekávání nepřináší zlepšení oproti samotnému hledání maxima signálu, jelikož vzhledem k tomu, že není možné jednoznačně určit, která maxima a minima budou do výpočtu zahrnuta, dochází vlivem šumu k výraznému posuvu naměřeného místa.

Z hlediska přesnosti detekce je tedy vhodné použít korelační metodu s vhodným modelem proužku nebo metodu fitování proužku, přičemž je přesnější její varianta s detekcí maxima, které je nejbližší maximu obálky (což je patrné i na obrázku 3.18a, kde povrch vypočítaný pomocí této varianty má méně šumu než při detekci obálky).

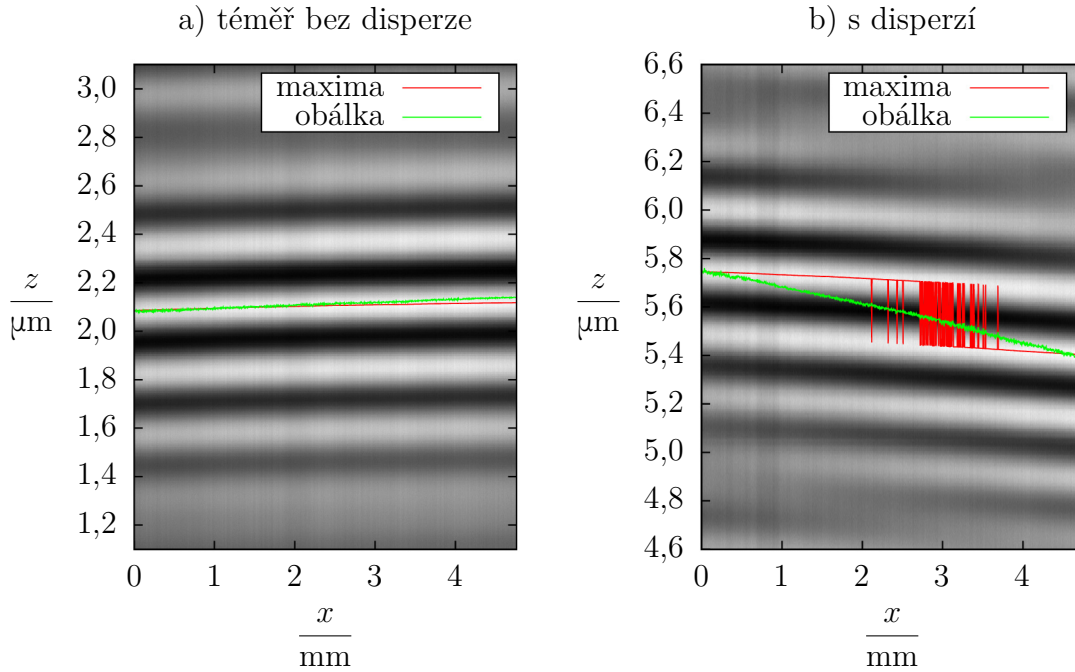
3.5.3. Odolnost metod vůči disperzi

V laserové interferometrii používáme v Michelsonově interferometru jako dělič často klín, čímž se osa nežádoucích odrazů na optických komponentech skloní vůči ose hlavního svazku, a tedy tyto odražené svazky dále neovlivňují měření, k čemuž by vzhledem k velké koherenční délce vlivem jejich interference s hlavním svazkem mohlo dojít. Použití klínového děliče znamená v interferometrii nízké koherence nutnost použít též klínovou kompenzační desku.

Pokud bychom použili planparalelní dělič a kompenzační desku, pak by kompenzační deska měla pouze dva stupně volnosti ovlivňující tvar interferenčního proužku (rotace kolem dvou navzájem kolmých os, které jsou kolmé na osu kompenzační desky). Jakékoliv její neoptimální umístění způsobí, že tloušťka skla, kterou svazek prochází v jedné větvi interferometru, se bude lišit od tloušťky skla, kterou svazek prochází ve větvi druhé. Tento rozdíl tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd bude ve všech bodech svazku stejný, a tedy tvar interferenčního proužku bude ve všech bodech svazku stejný (nebude však symetrický, viz obrázky 3.9 a 4.6). Pokud tedy detekční metoda dokáže detekovat vždy stejnou část signálu (např. maximum signálu, které je nejbližší maximu obálky), mírně neoptimální nastavení planparalelní kompenzační desky téměř neovlivňuje měření profilu povrchů.

Jsou-li dělič a kompenzační deska klínové, pak kompenzační deska má čtyři stupně volnosti (posunutí ve směru klínu a rotaci kolem všech tří os), je tedy mnohem těžší najít její optimální polohu. V případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky již rozdíl tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd , kterými svazek prochází, nemusí být pro všechny body svazku stejný jako v případě planparalelní kompenzační desky. Interferenční proužek pak může mít v různých bodech svazku různý tvar (což je patrné na obrázku 3.8, kde na grafech a) a c) nejsou interferenční proužky stejné). Změnu tvaru proužku v různých místech svazku si lze pro mírně neoptimálně nastavenou klínovou kompenzační desku představit jako posouvání obálky signálu, viz obrázek 3.18. Jelikož tvar interferenčního proužku může být v různých bodech svazku různý, některé detekční metody (zejména ty, které detekují v signálu maximum) poté vyhodnotí rovinu jakožto schody (viz obrázky 3.14a a 3.18b). Nalézt optimální polohu klínové kompenzační desky může být obtížné, proto má smysl zabývat se též odolností metod vůči tomuto jevu.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE



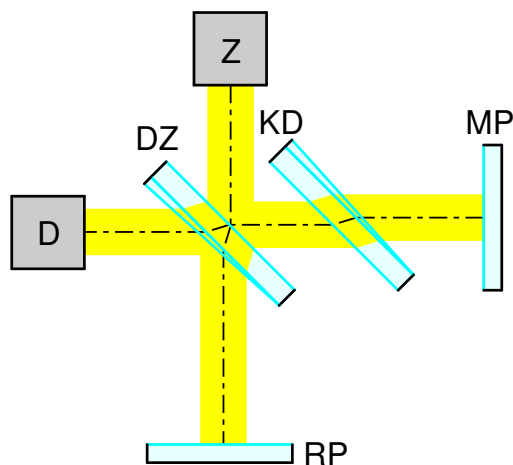
Obrázek 3.18: Naměřené intenzity v různých polohách z měřicího zrcadla pro jeden řádek bodů kamery pro případ, kdy je klínová kompenzační deska nastavena téměř optimálně, a případ, kdy s ní bylo mírně otočeno. Sklonění proužků je způsobeno sklonem normály měřeného povrchu vůči ose svazku. Vyznačené profily jsou vypočítány pomocí metody fitování proužku pomocí obou možných způsobů detekce středu proužku (maximum obálky a maximum signálu, které je nejbližší maximu obálky). V případě, kdy není kompenzační deska vhodně nastavená, je přesnější použít detekci obálky. V případě téměř optimálního nastavení je pak na vypočítaných profilech viditelné, že při detekci maxima má naměřený povrch méně šumu, což potvrzuje výsledky uvedené v tabulce 3.2.

Kompenzační deska má vždy obě lámavé plochy rovinné. Proto je rozdíl tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd vždy funkcí dvou proměnných, které určují polohu ve svazku (např. v rovině detektoru), která určuje v prostoru rovinu. Konkrétní tvar této funkce je dán nastavením kompenzační desky. Dále budeme pro jednoduchost uvažovat, že Δd závisí pouze na jedné proměnné, jedná se tedy o lineární funkci. Příklad pro rotaci klínové kompenzační desky o 180° kolem její osy je uveden na obrázcích 3.19 a 3.20.

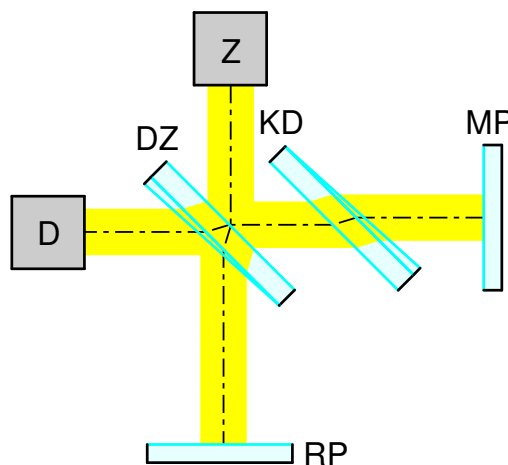
Pro ověření, že metody odolné vůči disperzi způsobí pouze sklonění povrchu (které lze snadno odstranit odečtením roviny od naměřeného povrchu) a nikoliv jinou deformaci, byla provedena v prostředí MATLAB numerická simulace. Pro různé rozdíly tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd jsou vypočítány interferenční proužky (příklad pro několik hodnot Δd viz obrázek 3.21a). Následně je určen střed každého z vypočítaných interferenčních proužků, a to pomocí obou variant metody fitování proužku (tedy hledání maxima obálky a hledání maxima signálu, které je maximu obálky nejbližší). Model předpokládá situaci, kdy před měřením pomocí bílého světla nastavíme interferometr pomocí laseru tak, aby v případě, že měříme rovinný vzorek, na výstupu laserové části interferometru byla intenzita ve všech místech svazku stejná (a tedy pro všechna místa svazku je pro vlnovou délku laseru optická dráha stejná). Výstupem je závislost detekované polohy středu interferenčního proužku z pomocí obou metod na rozdílu tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd (viz obrázek 3.21).

3.5. SROVNÁNÍ METOD DETEKCE STŘEDU PROUŽKU

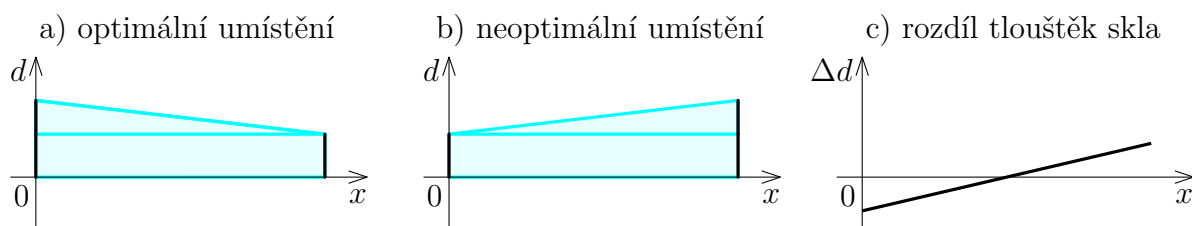
a) optimální kompenzace disperze



b) otočená kompenzační deska

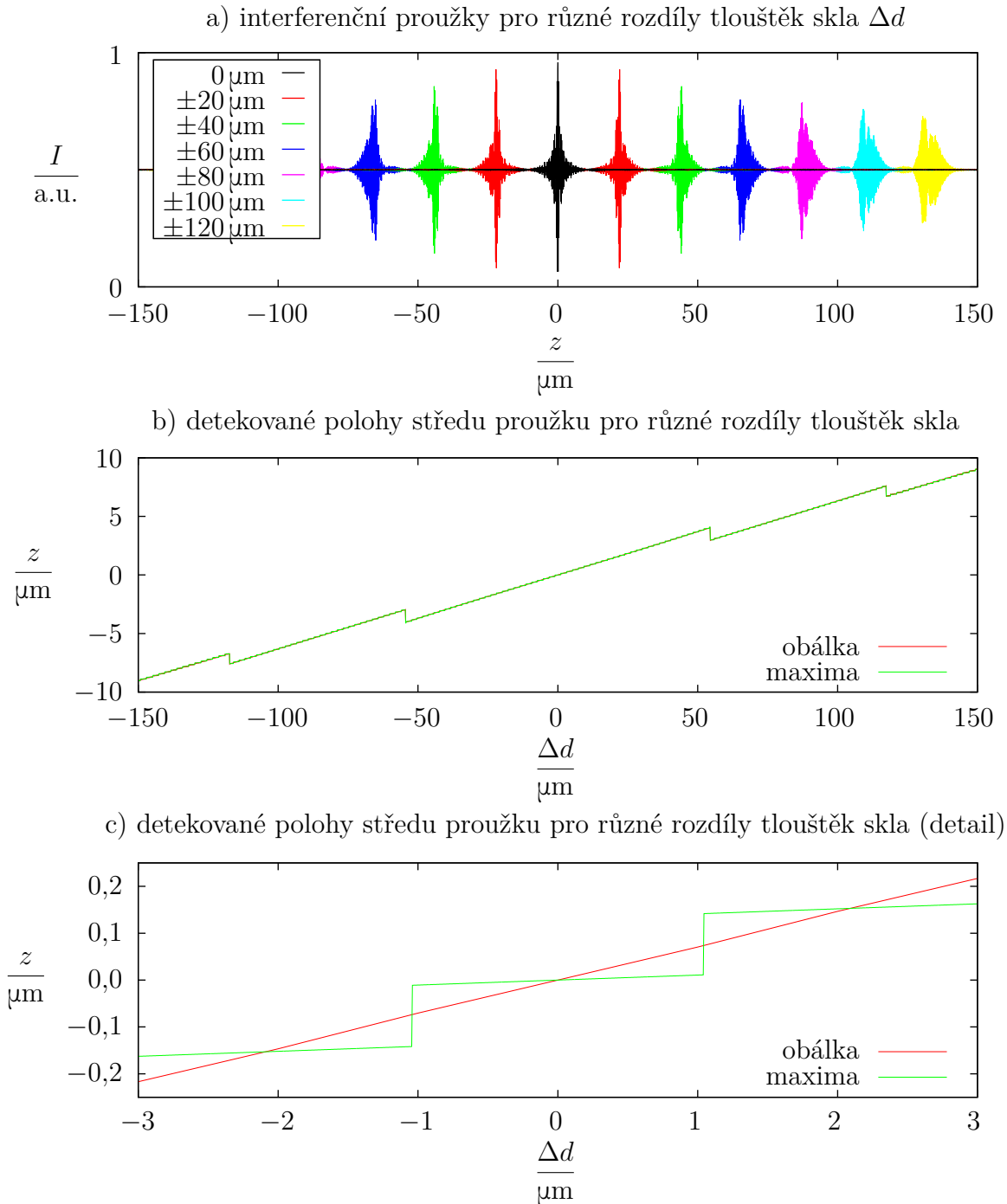


Obrázek 3.19: Rotace klínové kompenzační desky: a) klínová kompenzační deska je optimálně nastavena, ve všech bodech svazku je kompenzována disperze (svazek v obou větvích interferometru prochází stejnou tloušťkou skla), interferenční proužek bude mít ve všech místech stejný tvar (viz obrázek 3.18a); b) klínová kompenzační deska je otočena o úhel 180° kolem své osy, na ose svazku je disperze kompenzována optimálně, v jiných místech však nikoliv – na jedné straně od osy svazku je disperze nedokompenzována (tedy ve větvi interferometru obsahující kompenzační desku prochází svazek menší tloušťkou skla než v druhé větvi), na druhé naopak překompenzována (svazek ve větvi obsahující kompenzační desku prochází větší tloušťkou skla než v druhé větvi). Vlivem toho bude mít interferenční proužek v různých místech svazku různý tvar (pro malý úhel otočení kompenzační desky viz obrázek 3.18b). Pro přehlednost jsou klínové komponenty na obrázku rozděleny na planoparalelní a klínovou část, úhel klínů je zvětšený oproti skutečnému a není uvažován lom na klínových částech komponent (a tedy různé sklonění svazku při otáčení kompenzační deskou). Z – zdroj (LED), DZ – dělič svazku, KD – kompenzační deska, MP – měřený povrch, RP – referenční povrch, D – detektor (kamera).



Obrázek 3.20: Neoptimálně otočená klínová kompenzační deska: a) optimálně umístěná klínová kompenzační deska (podle obrázku 3.19a, otočeno), b) neoptimálně umístěná klínová kompenzační deska (podle obrázku 3.19b) c) rozdíl tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd pro různé polohy ve svazku x pro toto neoptimální umístění klínové kompenzační desky. Jelikož má kompenzační deska obě lámavé plochy rovinné, Δd bude vždy lineární funkcí x . Pokud by kompenzační deska byla planoparalelní, při jejím neoptimálním nastavení by se jednalo o konstantní funkci.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE



Obrázek 3.21: Výsledky numerické simulace vlivu disperze na měření profilu povrchů. Byly použity vlastnosti skla SCHOTT N-BK7. a) Různé podoby interferenčních proužků pro různé rozdíly tloušťek skla ve větvích interferometru Δd , což odpovídá různému neoptimalnímu nastavení kompenzační desky (viz obrázek 3.20). b) Závislost polohy pomocí metody fitování proužku (obou variant) detekovaného středu interferenčního proužku na rozdílu tloušťek skla ve větvích interferometru je přibližně pro interval $\Delta d \in (-50 \mu\text{m}; 50 \mu\text{m})$ lineární, a tedy nedojde k deformaci měřeného povrchu. Vertikální osa grafu b) neodpovídá posunutím zobrazeným na grafu a) (kde je znázorněno skutečné posunutí proužku), protože na grafu b) je zohledněno nastavení interferometru pomocí HeNe laseru před započítáním měření. c) Detail závislosti z z grafu b) pro malé Δd , kde si můžeme všimnout podobnosti s měřením na obrázku 3.22.

3.5. SROVNÁNÍ METOD DETEKCE STŘEDU PROUŽKU

Podle provedené simulace je závislost detekované polohy středu interferenčního proužku z na rozdílu tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd při použití detekce maxima obálky lineární pro $\Delta d \in (-50 \mu\text{m}; 50 \mu\text{m})$. Pro větší Δd , což odpovídá velmi špatně nastavené kompenzační desce, je jich interferenční proužek značně nesymetrický (viz obrázek 3.21a) a závislost $z(\Delta d)$ se již od lineární liší.

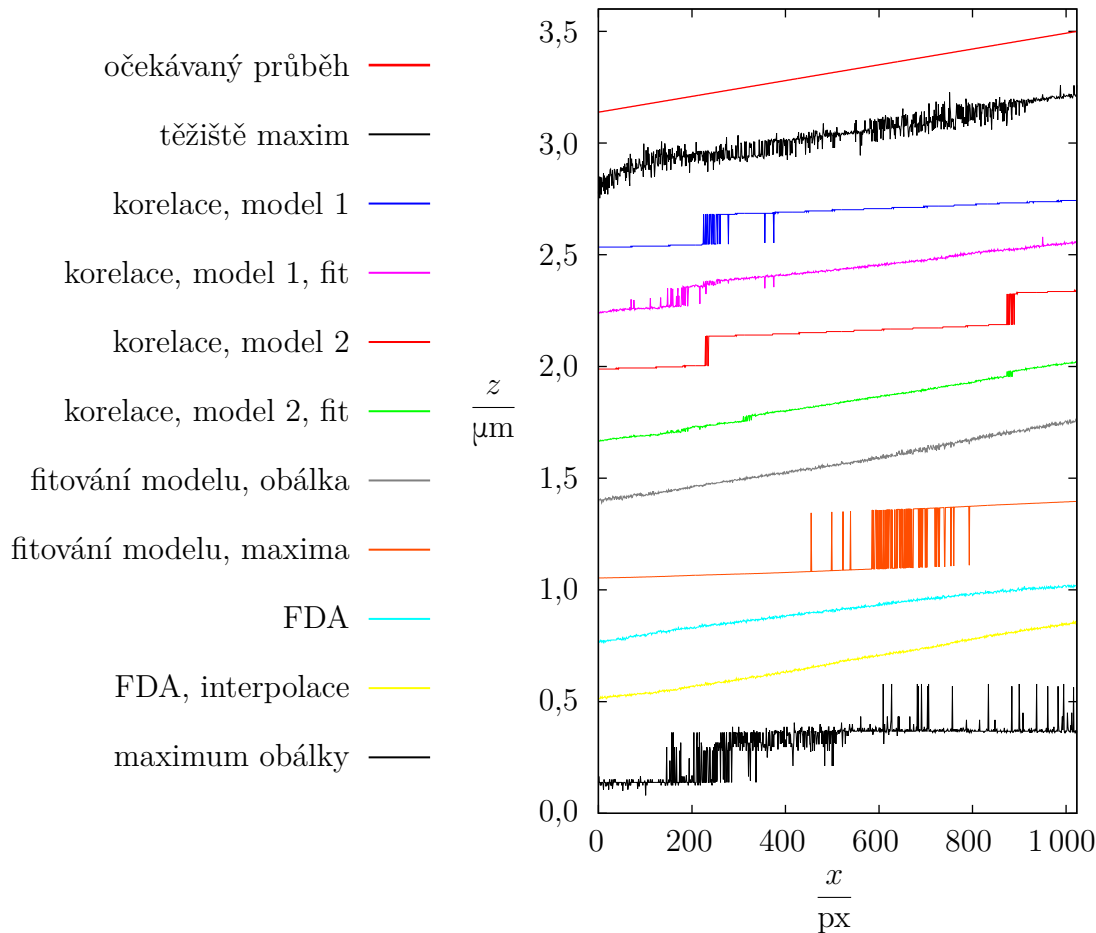
Jelikož závislost detekované polohy středu interferenčního proužku z na rozdílu tlouštěk skla ve větvích interferometru Δd je pro malá Δd lineární a i závislost Δd na poloze ve svazku (např. v rovině detektoru) je lineární (v některých případech konstantní, např. při použití planparalelního děliče a kompenzační desky), pak i závislost detekované polohy středu interferenčního proužku na poloze ve svazku je lineární. Na základě této numerické simulace je tedy možné říci, že použijeme-li metodu odolnou vůči disperzi, pak malá chyba v nastavení kompenzační desky nezpůsobí deformaci v měřeném profilu povrchu.

Bylo provedeno měření, při kterém v obou větvích interferometru byla zrcadla s vysokou rovinností a poloha kompenzační desky byla mírně změněna oproti optimálnímu nastavení použitému v části 3.5.2. Naměřená data byla zpracována metodami popsány v části 3.3. Pokud je metoda odolná vůči nevhodnému nastavení klínové kompenzační desky, pak by vypočítaný povrch měl být rovinný, bez schodů. Z naměřených povrchů byly pro názornost vytvořeny řezy ve vodorovném směru, což byl směr, ve kterém by (v případě neodolnosti metody vůči disperzi) byly viditelné schody. Naměřené řezy jsou uvedeny na obrázku 3.22. Naměřené povrchy byly poté zpracovány jako v části 3.5.2, vypočítané hodnoty střední aritmetické úchytky povrchu jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Hodnoty střední aritmetické úchytky povrchu pro neoptimálně nastavenou kompenzační desku vypočítané dle rovnice (3.6) z povrchů určených pomocí různých metod detekce středu interferenčního proužku. Jedná se o průměr z pěti měření. Průměrná vzdálenost vzorků byla asi 4,6 nm.

metoda	$\frac{Ra}{\text{nm}}$
maximum signálu	56,5
těžiště maxim	23,7
korelace, model 1	30,0
korelace, model 1, fit	7,4
korelace, model 2	36,7
korelace, model 2, fit	7,1
fitování proužku, obálka	6,6
fitování proužku, maxima	60,5
FDA	22,4
FDA, interpolace	4,8
maximum obálky	50,7

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE



Obrázek 3.22: Naměřený řez profilem roviny při neoptimálně nastavené klínové kompenzační desce zpracovaný pomocí různých metod. Jelikož se jedná o řez rovinou, měla by být detekována přímka. Korelace s použitím modelu proužku vypočítaného z naměřeného spektra doplněná o fitování korelace parabolou, fitování proužku modelem v případě, že zjišťujeme polohu maxima fitované obálky, a také metoda FDA jsou proti neoptimálnímu nastavení odolnější, a tak roviny detekují téměř jako roviny bez schodů. Jednotlivé řezy jsou pro přehlednost vertikálně posunuty.

Z naměřených dat plyne, že odolnější vůči nevhodnému umístění klínové kompenzační desky jsou metody založené na detekci obálky signálu (korelační metoda doplněná o fitování vzájemné korelace parabolou a fitování proužku v případě, že detekujeme maximum fitované obálky), neboť ta se v rámci měření roviny spojitě posunuje. Vůči disperzi je též odolná metoda FDA. To, že detekované roviny nejsou kolmé na osu svazku, nám při měření profilu povrchů obvykle nevádí, jelikož částí povrchu, která má být vodorovná, můžeme proložit rovinou a tu následně od celého povrchu odečíst. Metody založené na detekci interferenčního maxima či minima v blízkosti maxima obálky zde naopak selhávají, jelikož vlivem posunu obálky dojde k detekci jiného bodu, což se projeví vznikem schodů jako na obrázku 3.14a. V tabulce 3.3 jsou u korelační metody bez fitování parabolou hodnoty přibližně poloviční oproti metodě fitování proužku a detekci maxima nejbližšího maxima obálky, jelikož v případě korelační metody počítáme vzájemnou korelaci absolutních hodnot, kvůli čemuž nedetekujeme pouze maxima, ale i minima, a tedy naměřené schody mají poloviční výšku (viz obrázek 3.22).

3.6. VÝBĚR METODY DETEKCE STŘEDU PROUŽKU

Vzhledem k tomu, že při změně polohy kompenzační desky bylo nutné změnit též polohu vzorku (zrcadla), byla měřena jeho jiná část. Proto na základě porovnání hodnot v tabulkách 3.2 a 3.3 nelze usuzovat na to, zda se střední aritmetická úchylka povrchu pro metody odolné vůči disperzi zvýšila vlivem nastavení kompenzační desky či měřením jiného místa vzorku.

Odolnost vůči disperzi zvyšuje rozlišení v případě měření profilu povrchů, při kterém detekujeme interferenci v mnoha bodech (např. kamerou). Při některých měřeních však může být nežádoucí. Na obrázku 3.18a je kompenzační deska téměř ideálně nastavená, a tak při detekci maxima nedojde k vytvoření schodů jako na tomtéž obrázku vpravo. Vlivem malé neoptimálnosti nastavení kompenzační desky je však v případě detekce obálky povrch naměřen jakožto šikmý. Změříme-li povrch v mnoha bodech, obvykle nám tato skutečnost nevádí. Pokud bychom ale měřili pouze např. ve dvou bodech, které by odpovídaly levému a pravému okraji snímače kamery, a měřili rozdíl výšek povrchu v těchto bodech, naměřili bychom vyšší než skutečnou hodnotu.

Jestliže víme, že nemůže dojít ke vzniku schodů jako na obrázku 3.14a (např. jsou-li dělič a kompenzační deska planoparalelní), pak je přesnější hledat nějaké maximum v naměřeném signálu (např. to nejbližší maximu obálky), jelikož při jeho detekci má naměřený povrch obvykle nižší šum, což je vidět na obrázku 3.18 a což též bylo naměřeno (viz tabulka 3.2).

Metody byly též testovány při detekci na signálu naměřeném v případě, že v každé větvi interferometru byl povrch z jiného materiálu (viz signály na obrázku 3.3). Korelační metoda i metoda FDA v tomto případě selhaly, jelikož často detekovaly jiné místo signálu. Pokud se výpočet vzájemné korelace omezil na malé okolí maxima signálu (2 μm na každou stranu), pak byla korelační metoda použitelná i v tomto případě. Výpočet obálky pomocí Hilbertovy transformace a fitování proužku (které však nejprve detekuje maximum signálu a výpočet provádí pouze na jeho okolí jako v případě modifikované korelační metody) fungovaly i při zpracování těchto signálů bez problémů.

3.6. Výběr metody detekce středu proužku

Z poznatků popsaných v části 3.5 vyplývá, že výběr metody detekce středu interferenčního proužku závisí na účelu použití. Má-li být metoda použita v realizované experimentální sestavě pro měření profilu povrchů, pak by měla být odolná vůči disperzi (protože jsou použity klínový dělič a kompenzační deska) a zároveň by se detekovaný povrch měl co nejvíce podobat skutečnému povrchu měřeného vzorku.

Obě podmínky splňuje korelační metoda při použití modelu vypočítaného ze spektra zdroje doplněná o fitování vzájemné korelace, metoda fitování proužku v případě, kdy detekujeme polohu maxima obálky, a také analýza ve frekvenční oblasti, provedeme-li před výpočtem interpolaci naměřených hodnot na ekvidistantní osu. Z těchto metod je metoda fitování proužku nejrychlejší, proto byla jako optimální vybrána právě tato metoda popsána v části 3.3.4.

3. INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

4. Návrh a realizace sestavy pro měření profilu povrchů

Na základě principů a metod popsaných v předchozích částech práce byla navržena a realizována sestava pro optické měření profilu povrchů, která kombinuje možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. V této kapitole je popsán návrh a realizace této sestavy.

4.1. Návrh sestavy

Pro měření profilu povrchů byl použit Michelsonův interferometr, viz obrázek 3.4 kombinující laserový zdroj a zdroj světla s krátkou koherenční délkou. Schéma navržené a realizované sestavy je na obrázku 4.1, přičemž ve schématu nejsou (stejně jako na předchozích schématech) vyobrazeny svazky vznikající v důsledku odrazů, které nejsou dále využity, jde o svazek směřující na obrázku 4.1 vpravo od zrcadla SZ a dva směřující na témže obrázku nahoru a dolů od kompenzační desky KD.

Zrcadla, čočky a další komponenty byly upevněny v držácích od firmy Thorlabs, které umožňují jemné polohování v dostatečném rozsahu. Sestava byla kvůli omezení vlivu vibrační realizována na antivibračním stole.

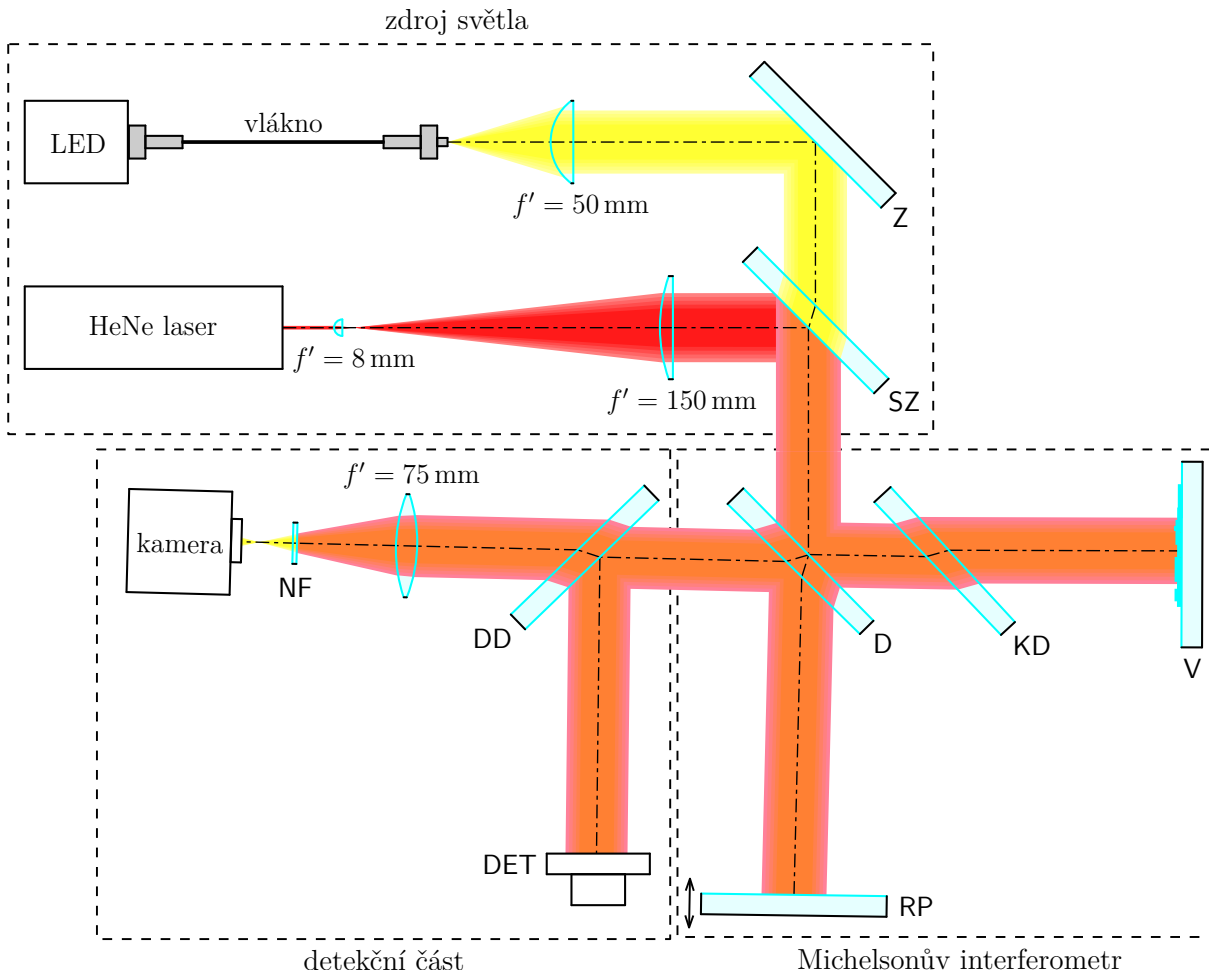
4.1.1. Návrh zdroje světla pro interferometr

Má-li být Michelsonův interferometr použit pro měření rovnosti optických drah v jeho větvích (a tedy k měření profilu povrchů) i pro měření změny polohy měřícího zrcadla, je třeba kombinovat zdroj světla s krátkou koherenční délkou a zdroj světla s vysokou koherencí.

Jako zdroj světla s krátkou koherenční délkou byla v sestavě použita LED Thorlabs MCWHF1 navázaná do optického vlákna Thorlabs M19L01. Předpokládáme-li, že apertura vlákna je velmi malá (použité vlákno má aperturu $200\ \mu\text{m}$), z jeho konce bude vycházet světlo ve tvaru kužele, s vrcholovým úhlem asi 25° (numerická apertura vlákna je 0,22). Vložíme-li za konec vlákna spojnu čočku tak, aby její ohnisko splývalo s aperturou vlákna a její osa byla totožná s osou vlákna, za čočkou vznikne téměř rovnoběžný svazek. Požadujeme průměr svazku 15 mm, proto byla z dostupných čoček použita čočka s ohniskovou vzdáleností $f' = 50\ \text{mm}$. Jelikož byla použita bílá LED, byl použit achromatický dublet Thorlabs AC254-050-A-ML. Svazek bílého světla dopadal v úhlu asi 45° na zrcadlo (na obrázku 4.1 označené Z), změnou jehož polohy a úhlu bylo možné měnit polohu a úhel svazku bílého světla vůči interferometru.

Pro měření změny polohy měřícího zrcadla byl použit helium–neonový laser Thorlabs HNL008L-EC. Pro další použití navržené sestavy bylo požadováno, aby laserový svazek měl průměr odpovídající svazku bílého světla. K rozšíření svazku bylo užito dvojice

4. NÁVRH A REALIZACE SESTAVY PRO MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ



Obrázek 4.1: Schéma experimentální sestavy pro optické měření profilu povrchů, kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. Z – zrcadlo, SZ – polopropustné zrcadlo pro sloučení svazků, D – hlavní (klínový) dělič, KD – kompenzační deska (klínová), RP – referenční povrch, V – měřený vzorek, DD – polopropustné zrcadlo 20%, NF – notch filtr (pásmová zádrž), DET – fotodetektor.

spojných čoček se společným ohniskem, tedy Keplerova dalekohledu. Byly použity čočky o obrazových ohniskových vzdálenostech $f'_1 = 8 \text{ mm}$ a $f'_2 = 150 \text{ mm}$, které umožní příčné zvětšení (rozšíření svazku) asi $M = -18$ (zvětšení je záporné, vystupující svazek je převrácený).

Svazek bílého a laserového záření bylo pro použití v Michelsonově interferometru třeba sloučit. K tomu bylo použito polopropustné zrcadlo (na obrázku 4.1 označené SZ). Část svazku bílého světla se na zrcadle odráží (a je nevyužita), část prochází. Stejně tak část laserového svazku se odráží a část prochází (a je dále nevyužita). Změnou polohy a úhlu polopropustného zrcadla SZ bylo možné měnit polohu a úhel laserového svazku vůči interferometru.

Kombinací změny polohy a úhlu zrcadla (na obrázku 4.1 označeného Z) a polopropustného zrcadla (SZ) bylo možné dosáhnout sousosti bílého a laserového svazku a také toho, že oba svazky procházely interferometrem po vhodné dráze.

4.1.2. Návrh interferometru

Vlastní sestava pro měření profilu povrchů byla realizována v podobě klasického Michelsonova interferometru (viz obrázek 3.4).

Jako dělič svazku bylo použito 2" polopropustné klínové (úhel 1°) zrcadlo ze skla BK7. Ze stejného materiálu byla též kompenzační deska se stejným tvarem.

Vzorek (jež v Michelsonově interferometru plnil roli referenčního zrcadla) byl umístěn na mikrometrických posuvech, aby bylo možné měnit jeho polohu vůči ose svazku, a tak měřit různé jeho části bez demontáže jeho držáku.

Referenční plocha (v Michelsonově interferometru jde o měřicí zrcadlo) byla umístěna na piezo posuvu Physik Instrumente P-628.1CL, který umožňuje pohyb o 0,8 mm s krokem 0,5 nm. Navíc obsahuje kapacitní snímač polohy, který bylo možné využít k ověření měření pomocí laserového interferometru. Protože při hledání polohy měřicího zrcadla, při které dojde k interferenci bílého světla, je třeba referenční plochu posunovat více než je rozsah posuvu PI, posuv PI byl umístěn na posuvu Thorlabs s mikrometrickým šroubem.

4.1.3. Návrh detekční části

Na výstupu Michelsonova interferometru je třeba detekovat interferenci bílého a laserového světla odděleně. Z toho důvodu byl svazek rozdělen polopropustným zrcadlem (na obrázku 4.1 označeno DD).

Interference laserového záření byla detekována pouze v jednom místě svazku pomocí fotodetektoru. Při návrhu se předpokládalo, že intenzita laserového záření bude na fotodetektoru mnohem vyšší než bílého světla, a tedy interference bílého světla signál na fotodetektoru ovlivní jen zanedbatelně. To bylo následně ověřeno měřením. V opačném případě by bylo třeba před fotodetektor vložit filtr, který by propouštěl pouze vlnové délky blízké 633 nm. Fotodetektor byl připojený ke kartě National Instruments USB-6212, která byla připojena pomocí USB k počítači.

Pro detekci interference bílého světla bylo třeba odfiltrovat laserové záření. K tomu byla použita pásmová zádrž Thorlabs NF633-25 pro vlnovou délku 633 nm. Tím bylo ze svazku odfiltrováno světlo pocházející z laseru, ale jen malá část intenzity bílého světla.

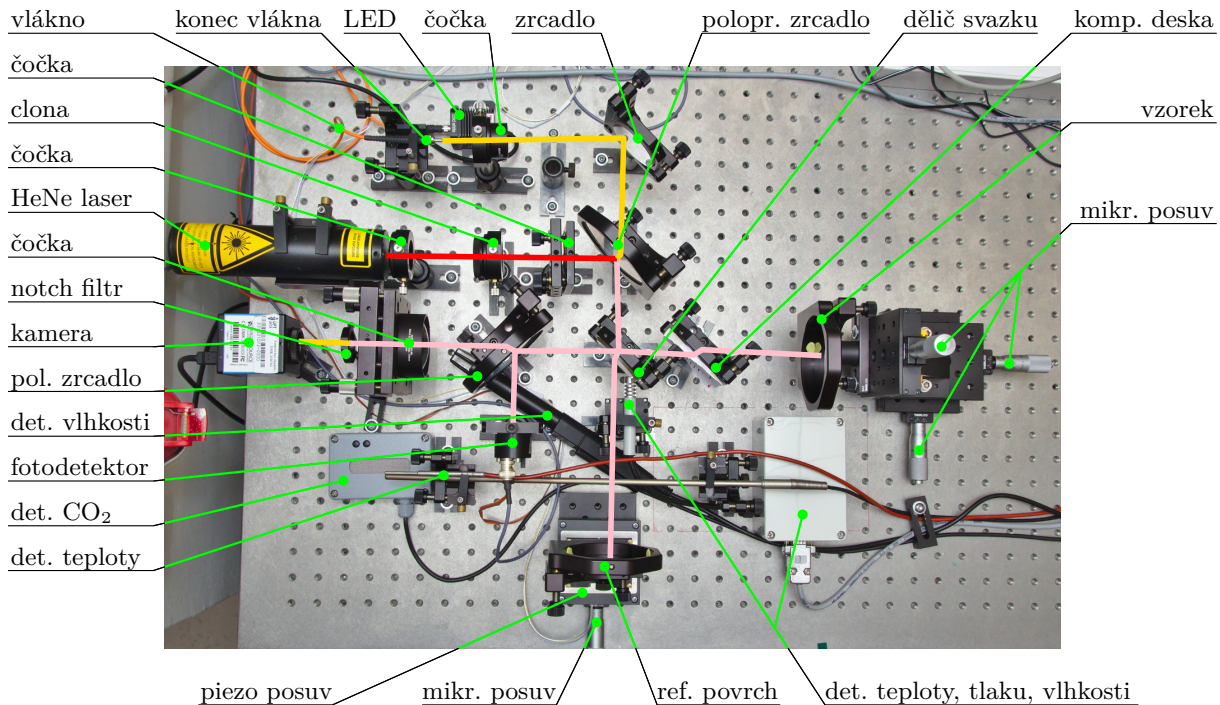
Pro detekci interference bílého světla byla použita černobílá kamera bez objektivu The Imaging Source DMK 31BU03 se snímačem o velikosti úhlopříčky $1/3''$, rozlišením $1024 \text{ px} \times 768 \text{ px}$ a maximální frekvencí snímků 30 s^{-1} . Byla připojena pomocí USB k počítači.

Velikost snímače použité kamery je mnohem menší než průměr svazku, proto by přímo bylo možné měřit jen profil povrchu velmi malé části vzorku. Pro změnu průměru svazku by bylo možné opět použít Keplerův dalekohled jako v případě změny průměru laserového svazku (tentokrát vzhledem k bílému světlu s achromatickými čočkami), nicméně s žádnou dvojicí achromatických čoček, které byly k dispozici a které by umožnily dostatečné zmenšení, se nepodařilo dosáhnout dostatečného výsledku, obraz byl vždy rozostřený a též bylo velmi patrné zkreslení. Proto byla před kameru a filtr vložena jedna achromatická spojná čočka Thorlabs AC508-075-A1-ML o obrazové ohniskové vzdálenosti 75 mm. Dle polohy kamery pak bylo zvětšení různé, což umožnilo měřit povrch po celé ploše svazku, ale i měřit pouze detail povrchu. Nevýhodou bylo, že po každé změně polohy kamery bylo třeba udělat snímek předmětu známé velikosti umístěného do svazku, aby bylo možné určit měřítko obrazu.

4. NÁVRH A REALIZACE SESTAVY PRO MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ

4.2. Realizace sestavy

Sestava byla realizována v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i. Fotografie realizované sestavy je na obrázku 4.2.



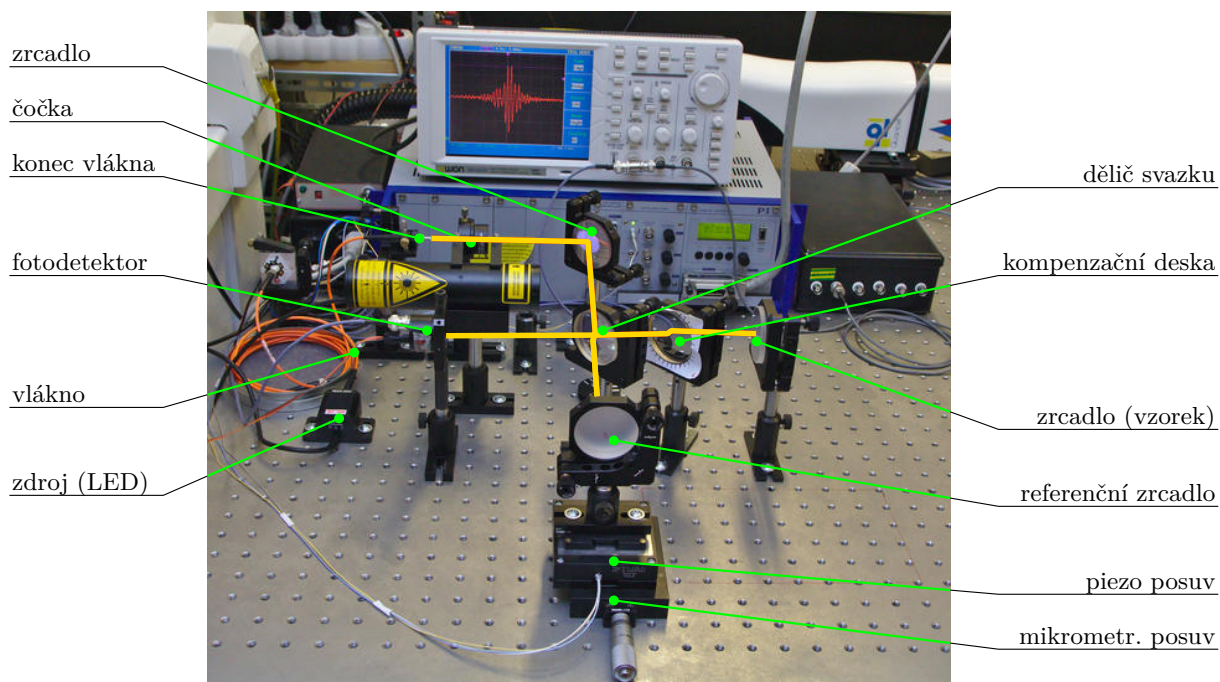
Obrázek 4.2: Sestava pro měření profilu povrchů kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. Žlutou barvou je znázorněna osa svazku bílého světla, červenou barvou osa laserového svazku a růžovou barvou osa svazku bílého a laserového světla.

4.2.1. Realizace optické části

Před realizací celé navržené sestavy byl sestaven Michelsonův interferometr dle schématu na obrázku 3.4, viz obrázek 4.3. Ten sloužil zejména k nastavení zdroje bílého světla a nastavení kompenzační desky.

Pro nastavení nebyly ve větvích interferometru použity dále měřené povrchy, ale dvě stejná 2" zrcadla, aby bylo možné vyloučit např. problémy vzniklé nedostatečnou rovinností obou ploch. Aby bylo možné později pozorovat interferenci bílého světla, zrcadla v obou větvích byla umístěna tak, aby optické dráhy v obou větvích byly podobné (v prvním přiblížení je možné porovnávat dráhy geometrické).

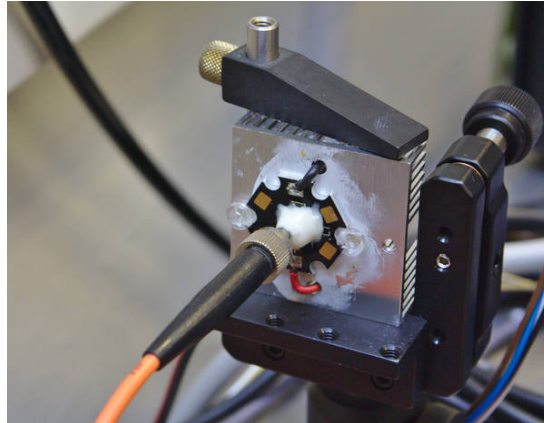
Nejprve byl jako zdroj světla použit pouze HeNe laser. Laserový svazek byl pomocí zrcadla nasměrován tak, aby byl rovnoběžný s optickým stolem a dopadal na dělič svazku přibližně pod úhlem 45°. Poloha kompenzační desky byla upravena tak, aby byla přibližně rovnoběžná s děličem. Poté byla zrcadla v obou větvích interferometru nastavena tak, aby na výstupu byly osy svazků z obou větví totožné. Do výstupu interferometru byla vzhledem k malému průměru svazku umístěna spojná čočka, aby bylo možné pozorovat, zda jsou svazky skutečně rovnoběžné (a tedy je intenzita na výstupu stejná po celé ploše) nebo svírají malý úhel (a jsou vidět proužky, jejichž hustota roste s úhlem, který svazky svírají).



Obrázek 4.3: Michelsonův interferometr s bílým světlem. Jako zdroj záření slouží LED navázaná do vlákna, za jehož koncem je umístěna čočka tak, aby vznikl rovnoběžný svazek. Žlutou barvou je přibližně naznačena osa svazku. Tato sestava sloužila k nastavení polohy kompenzační desky vůči děliči. Na osciloskopu je zobrazen naměřený interferenční proužek.

Jakmile byl interferometr pomocí laseru nastaven tak, aby na výstupu byla viditelná interference, laser byl vyměněn za zdroj bílého světla.

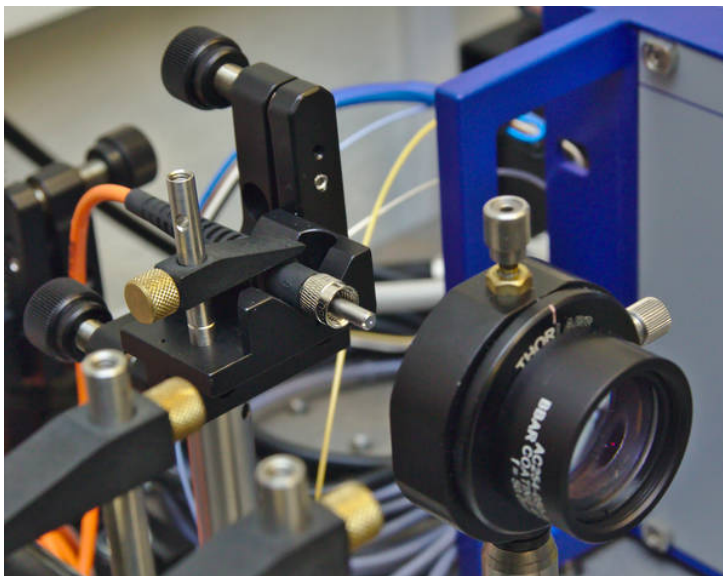
Jako zdroj bílého světla byla dle návrhu použita bílá LED navázaná do optického vlákna. Byly k dispozici dvě varianty (viz obrázek 4.4) – komerčně dostupná LED Thorlabs MCWHF1 navázaná do vlákna průměru 200 μm a LED CREE XP-G2 R5 přilepená k vláknu průměru 100 μm . V případě první varianty byla intenzita svazku vyšší, proto byla pro další experimenty i přes větší průměr apertury vlákna použita tato varianta.



Obrázek 4.4: Dvě varianty zdroje bílého světla – vlevo LED Thorlabs MCWHF1, vpravo LED CREE XP-G2 R5.

4. NÁVRH A REALIZACE SESTAVY PRO MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ

Druhý konec vlákna byl vodorovně uchycen do držáku a před jeho konec umístěna čočka tak, aby její ohnisko bylo v apertuře vlákna (viz obrázek 4.5). Vytvořil se tak rovnoběžný svazek bílého světla široký asi 15 mm, přičemž pro účely nastavení polohy svazku byla za čočku vložena clona, pomocí které bylo možné měnit průměr svazku. Rovnoběžnost svazku byla ověřena na délce asi 6 m (pomocí soustavy několika zrcadel).



Obrázek 4.5: Kolimace bílého světla. Ohnisko čočky (achromatický dublet) je v apertuře vlákna, za čočkou vzniká rovnoběžný svazek bílého světla.

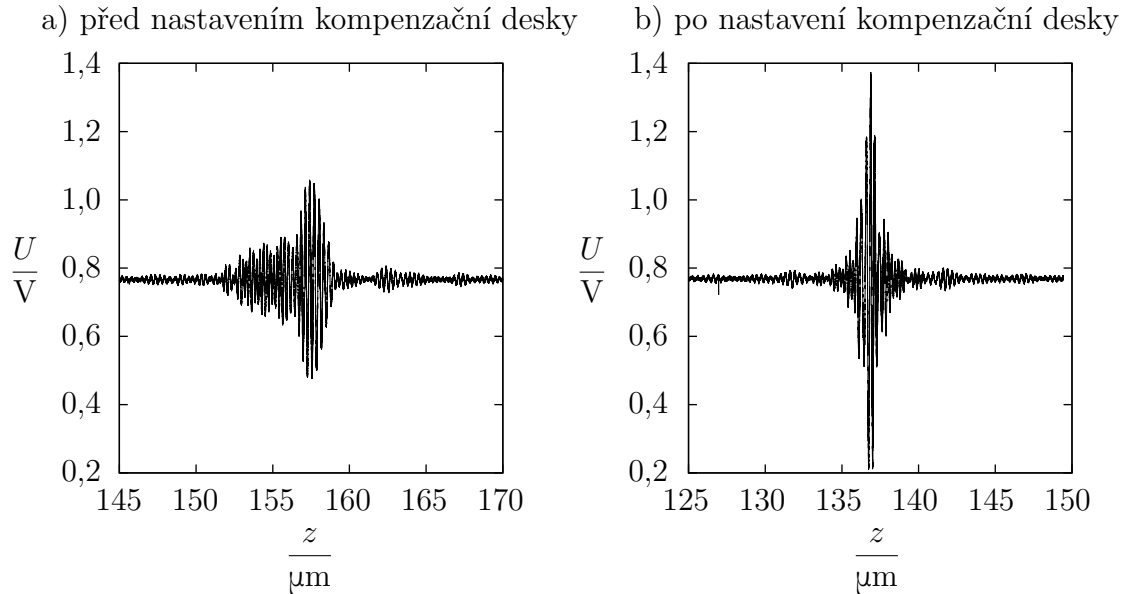
Svazek bílého světla se, stejně jako v případě laseru, odrážel od zrcadla, kterým bylo možné měnit polohu a úhel svazku vůči děliči svazku. Před odejmutím zrcadla pro laser byly do obou větví interferometru umístěny clony s aperturou v ose laserového svazku. Po výměně zdroje světla se tak mohlo docílit toho, že svazek bílého světla procházel interferometrem po stejné dráze jako laserový svazek.

Poté již bylo možné hledat polohu měřícího zrcadla, při které nastala interference bílého světla. Pomocí mikrometrického posuvu byla měněna poloha měřícího zrcadla vždy o 0,7 mm a pro každou polohu bylo spuštěno pomalé ladění piezo posuvem (s rozsahem 0,8 mm), přičemž na výstupu interferometru byl připojen osciloskop. Poloha byla měněna, dokud nebyla nalezena poloha, při které nastala interference bílého světla (viz obrázek 4.3).

Protože natočení kompenzační desky bylo zpočátku náhodné a její poloha nastavena pouze přibližně, vzhledem k tomu, že dělič svazku i kompenzační deska byly klínové, nastala interference jen na malém proužku svazku. Proto bylo třeba kompenzační desku otočit tak, aby vrcholy klínu děliče svazku a kompenzační desky měly stejnou orientaci. Postupnými úpravami polohy a natočení kompenzační desky se dospělo do stavu, kdy interferenční proužek byl symetrický, měl ostré maximum (viz obrázek 4.6) a k interferenci docházelo na celé ploše svazku.

Pro laserové záření byl sestaven Keplerův dalekohled pro rozšíření průměru svazku. Bylo třeba upravit polohu čoček tak, aby svazek byl rovnoběžný. Rovnoběžnost svazku byla ověřena na délce asi 6 m (pomocí soustavy několika zrcadel).

Jakmile byly k dispozici dva svazky světla o přibližně stejném průměru (jeden bílý, jeden laserový), byly spojeny pomocí polopropustného zrcadla tak, aby jejich osy splývaly a též splývaly s původní osou svazku.



Obrázek 4.6: Napětí na fotodetektoru (úměrné intenzitě) v závislosti na poloze měřícího zrcadla interferometru a) před nastavením, b) po nastavení kompenzační desky.

4.2.2. Měření indexu lomu vzduchu

Index lomu vzduchu byl měřen nepřímo na základě měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a koncentrace CO_2 . Teplota, tlak a vlhkost vzduchu byly měřeny pomocí jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu [21], přičemž hodnoty teploty a vlhkosti bylo možné srovnat s kalibrovanými přístroji, a koncentrace CO_2 pomocí přístroje ALMEMO 2490. Hodnoty uvedených veličin byly měřeny vždy během celého měření, takže bylo možné zjistit i změnu hodnoty indexu lomu vzduchu během měření.

4.3. Omezení realizované sestavy

Realizovaná sestava měla několik omezení vyplývajících z použitých komponent.

Kvůli malému průměru dělicího zrcadla a kompenzační desky a konstrukci jejich držáků, které neumožňují optimální průchod svazku v úhlu 45° ve všech čtyřech směrech (držák děliče vždy větší svazek na jedné straně ořeže), byl omezen maximální průměr svazku, který sestavou projde bez ořezání. Tím byla omezena maximální plocha vzorku, jejíž povrch mohl být analyzován na asi $1,1 \text{ cm} \times 1,1 \text{ cm}$. Měřené vzorky (3" křemíkové wafery) byly větší, takže bylo možné pozorovat vždy jen vybranou část povrchu. V případě, že by bylo třeba analyzovat větší část vzorku a nebylo možné jej měřit po částech, by bylo třeba použít dělič svazku a kompenzační desku větších průměrů, popř. použít jiné držáky, a jiné čočky, které by vytvořily svazek většího průměru.

Posuv použitého piezo posuvu byl v rozsahu $0,8 \text{ mm}$, což je zároveň omezení na maximální rozdíl výšek povrchu vzorku. Měřené vzorky měly výšku řádově menší, proto posuv nebyl omezující. Omezení by bylo možné odstranit např. použitím pojezdu s krokovým nebo piezo motorem.

Rozlišení v rovině kolmé na osu svazku (tedy v rovině vzorku) bylo dáno rozlišením použité kamery, tedy $1024 \text{ px} \times 768 \text{ px}$. Vzhledem k použití čočky před kamerou bylo možné s tímto rozlišením pozorovat jak celou plochu svazku, tak jeho malou oblast, proto rozlišení kamery nebylo pro provedená měření omezující. Protože byla použita pouze jedna

4. NÁVRH A REALIZACE SESTAVY PRO MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ

čočka místo dalekohledu, zvětšení obrazu záviselo na poloze kamery vůči čočce, nebylo tedy přesně definované a bylo třeba pro dané nastavení zjistit měřítko pomocí fotografie objektu známé velikosti vloženého do svazku.

Rozlišení ve směru osy svazku bylo dáno přibližně vzdáleností, kterou měřící zrcadlo urazilo mezi dvěma po sobě následujícími snímky. Vzhledem k tomu, že rychlost piezo posuvu (přesněji rychlost změny napětí na něm) bylo možné ovládat ve velkém rozsahu, a s přihlédnutím k přesnosti použitých metod detekce středu interferenčního proužku, neměla v tomto ohledu sestava omezení.

Rychlost měření byla omezena kamerou, která zvládá frekvenci snímků 30 s^{-1} . Aby bylo při interferenci bílého světla možné určit střed interferenčního proužku, je třeba mít v jeho místě dostatečné množství vzorků, a tedy rychlost pohybu měřícího zrcadla je třeba přizpůsobit rychlosti detektoru bílého světla. Je-li měření dostatečně krátké, index lomu vzduchu můžeme během něj považovat za konstantu a můžeme též zanedbat např. teplotní roztažnost, vlivem které může v průběhu měření dojít ke změně délek větví interferometru, a tedy k chybě měření. Vzhledem k tomu, že měřené povrchy měly výšku nejvýše řádově desítky mikrometrů, a tedy měření neprobíhala déle než několik jednotek minut, nebyla s přihlédnutím k nejistotám měření rychlost kamery omezující. V případě rozměrnějších vzorků by bylo vhodné použít rychlejší kameru, případně, pokud bychom nepožadovali velké rozlišení v rovině vzorku, pole fotodetektorů.

5. Měření profilu povrchů a srovnání s referenčním měřením

Na realizované sestavě pro optické měření profilu povrchů byla provedena řada měření různých vzorků. Tato kapitola provedená měření a jejich následné zpracování popisuje a prezentuje naměřené hodnoty. Jsou zde diskutovány též nejistoty provedených měření a některé naměřené hodnoty jsou srovnány s referenčním měřením.

5.1. Měření na realizované sestavě

Měření bylo řízeno pomocí počítače, a to dálkově, aby byl experiment co nejméně ovlivněn. Před měřením se sestava i se vzorkem několik hodin temperovaly, aby bylo možné minimalizovat vliv změny podmínek v průběhu měření. Během měření byla celá experimentální sestava zakryta, aby bylo omezeno proudění vzduchu, a tedy náhlé změny indexu lomu vzduchu. Vliv vibrací byl dále omezen pomocí antivibračního stolu.

Při měření bylo zjištěno, že vzdálená plocha výrazným způsobem zpomaluje získávání a ukládání dat. Navíc v případě pomalejšího připojení mezi počítačem, kterým je experiment řízen (tj. počítač, ke kterému je připojena kamera, měřicí karta apod. a na který se získaná data ukládají), a počítačem, ze kterého je ovládán, nebylo možné v reálném čase pozorovat obraz získaný z kamery, což měření značně znesnadňovalo (nebylo možné během měření jednoduše ověřit, že měřicí zrcadlo již projelo místem, při kterém došlo k interferenci bílého světla). Z toho důvodu bylo místo vzdálené plochy použito VNC, při jehož použití se žádný z popsaných problémů nevyskytoval.

Experiment byl řízen pomocí programovacího prostředí LabView. U piezo posuvu bylo možné měnit rychlost pohybu pomocí rychlosti změny napětí, přičemž byla na základě měření popsaných v části 3.5.2 pro měření povrchů zvolena taková hodnota, při které byla vzdálenost uražená mezi dvěma po sobě následujícími snímky průměrně asi 5 nm.

Obraz z kamery byl vždy uložen v plném rozlišení, přičemž hodnota každého pixelu byla reprezentována 8 bity, tj. 1 bytem, tj. číslem od 0 do 255, což při rozlišení $1024 \text{ px} \times 768 \text{ px}$ a ukládání i dalších informací znamenalo ukládání stálou rychlostí asi $23 \text{ MB} \cdot \text{s}^{-1}$. Použitý počítač nedokázal vždy během celého několikaminutového měření kontinuálně touto rychlostí bez přerušování na disk zapisovat. Přerušování znamenalo krátký výpadek nejen signálu z kamery, ale i z laserového interferometru, kvůli čemuž by mohla v případě delších výpadků být chybně určena poloha měřicího zrcadla. Proto byla během měření sledována doba získávání jednotlivých snímků z kamery a také doba zápisu získaných hodnot do souboru. Překročil-li součet těchto hodnot trojnásobek obvyklé doby (došlo tedy k výpadku alespoň dvou snímků), bylo měření ukončeno a opakováno.

5.2. Zpracování naměřených dat

Pro zpracování naměřených dat byly vytvořeny skripty pro prostředí MATLAB. Skript nejprve po snímcích načte binární soubor vytvořený LabView, přičemž z obrazové informace vybere pouze body určené ke zpracování (vzhledem k náročnosti výpočtu a velkému objemu dat nemusí snímky být vždy zpracovávány v plném rozlišení kamery). Následně na základě hodnot teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a koncentrace CO_2 vypočítá index lomu vzduchu dle rovnic (2.3)–(2.7) a určí jeho průměrnou hodnotu během měření (měření bylo vždy krátké a index lomu vzduchu se měnil nejvýše v řádu 10^{-8} , což je řádově přesnost této metody stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu, proto byl během každého měření považován za konstantu). Ze signálu z fotodetektoru pak z fáze analytického signálu vytvořeného pomocí Hiblertovy transformace vypočítá polohu měřicího zrcadla během měření (viz část 2.2.3). Pak pomocí korelace (přičemž jsou využívány oba popsání modely interferenčního proužku, bez i s fitováním parabolou), FDA (bez i s interpolací), maxima obálky, fitování proužku, těžiště maxima a pro kontrolu i pomocí maxima signálu určí pro každý zpracovávaný bod snímače kamery polohu středu interferenčního proužku (viz část 3.3), a tedy vypočítá profil měřeného povrchu (viz část 3.2). Všechny vypočítané hodnoty následně vykreslí do grafů a uloží na disk pro další zpracování. Uložené soubory je možné dále zpracovat opět v prostředí MATLAB, popř. vytvořit grafy v programu gnuplot (ve kterém byly vytvořeny všechny grafy uvedené v této práci) nebo např. v programu Gwyddion.

Součástí příloh této práce je skript `surf_analysis` pro prostředí MATLAB, který ukazuje použití vytvořených funkcí pro zpracování měření provedených na realizované sestavě (viz přílohy). Jsou přiloženy též dva soubory s daty, takže je možné skript přímo spustit, tyto soubory zpracovat a vykreslit profil měřeného povrchu.

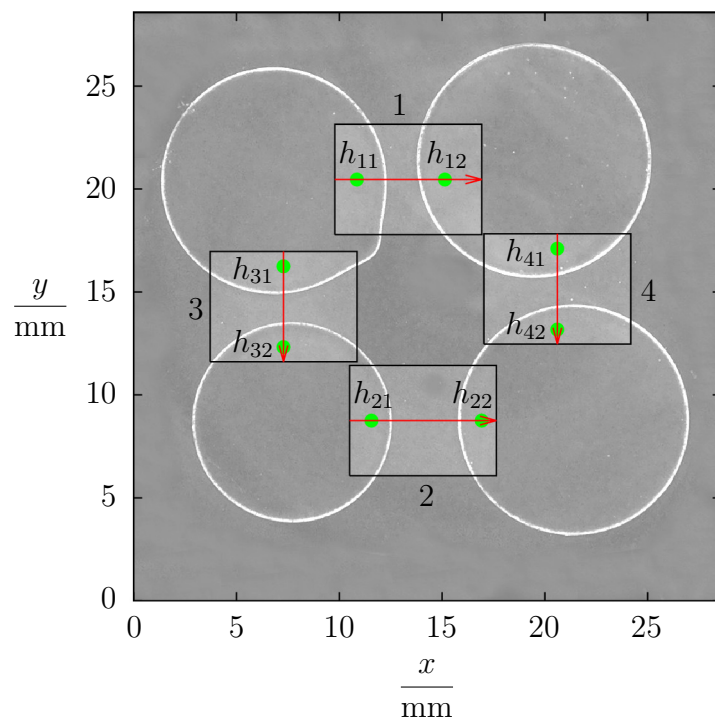
5.3. Měření hloubky leptané struktury

Jedním z měřených povrchů byl 3" křemíkový wafer (viz obrázky 5.1 a 5.2), na kterém byly leptáním vytvořeny čtyři struktury takové, že jejich hloubka byla přibližně $10\ \mu\text{m}$ (čehož bylo dosaženo vhodnou dobou leptání). Byly vybrány čtyři oblasti tohoto vzorku takové, aby každá obsahovala neleptaný povrch a dva leptané povrchy a bylo možné snadno identifikovat řezy povrchem pro srovnání s referenčním měřením.

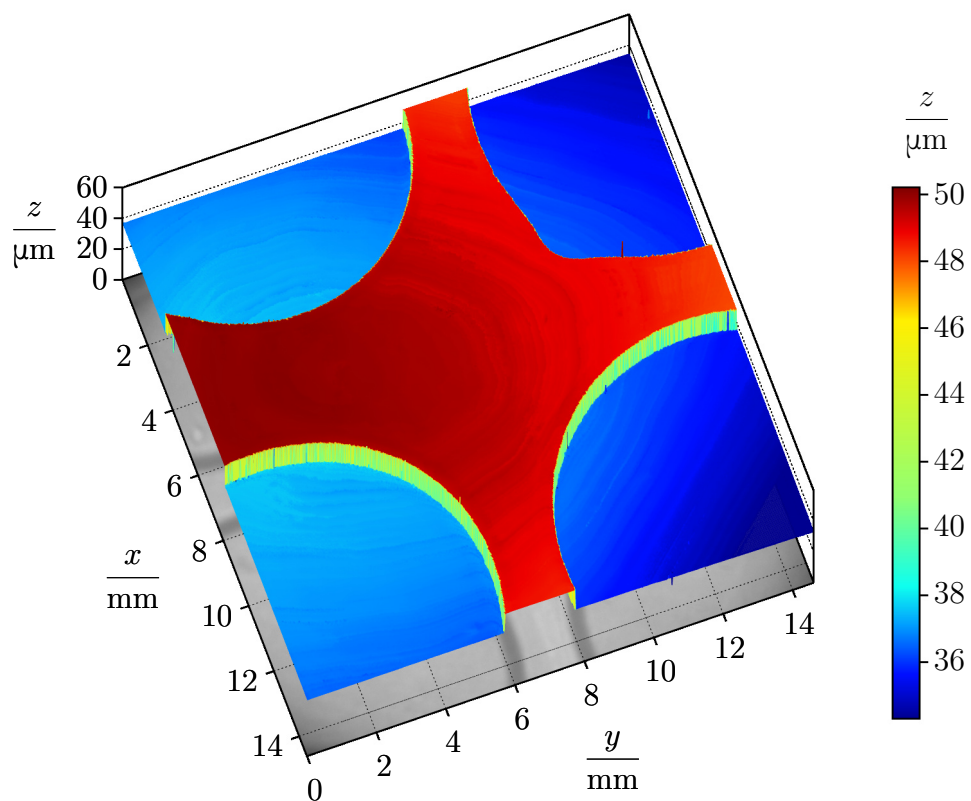
Každá z vybraných částí povrchu byla na realizované sestavě měřena dvanáctkrát, přičemž všechny naměřené povrchy byly vyhodnocovány pomocí všech metod detekce středu interferenčního proužku popsanych v části 3.3, aby bylo možné provést srovnání popsanych metod. Příklady naměřených profilů jsou uvedeny na obrázku 5.3.

Z naměřených profilů byly následně vypočítány řezy (viz obrázek 5.4) a určena hloubka míst vyznačených na obrázku 5.1 včetně nejistoty typu A jakožto výběrové směrodatné odchylky aritmetického průměru vynásobené $(1 - \alpha/2)$ -kvantilem Studentova rozdělení s $n - 1$ stupni volnosti, kde $\alpha = 5\%$ je hladina významnosti a $n = 12$ počet měření (viz tabulka 5.1), aby bylo možné srovnat hodnoty určené pomocí jednotlivých metod detekce středu interferenčního proužku.

5.3. MĚŘENÍ HLOUBKY LEPTANÉ STRUKTURY

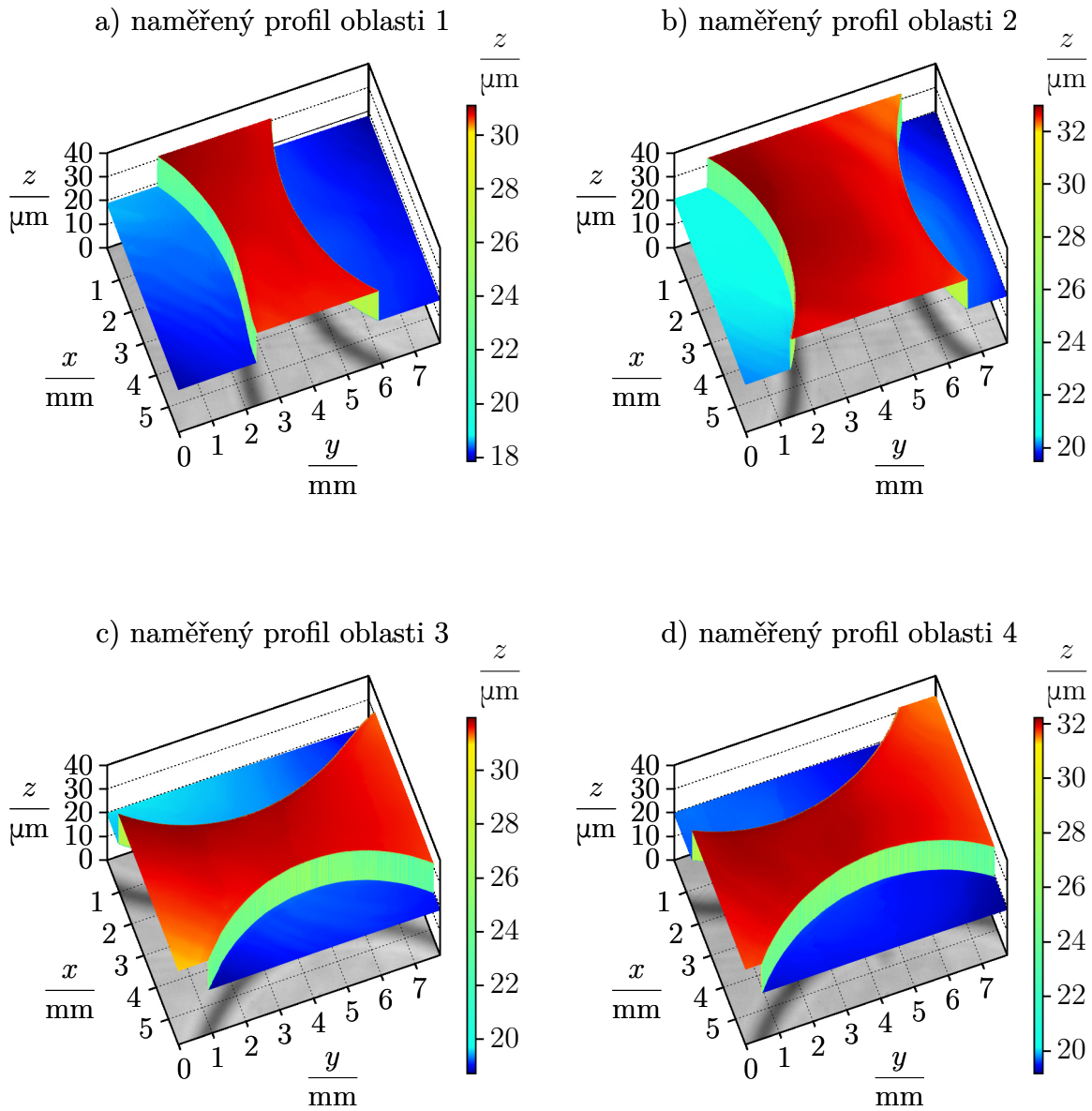


Obrázek 5.1: Fotografie měřeného vzorku s vyznačenými řezy (červeně) a body (zeleně), jejichž hloubka byla měřena (viz tabulka 5.1). Naměřené profily vyznačených oblastí jsou na obrázku 5.3. Hloubky h_{11} a h_{12} byly srovnány s referenčním měřením.



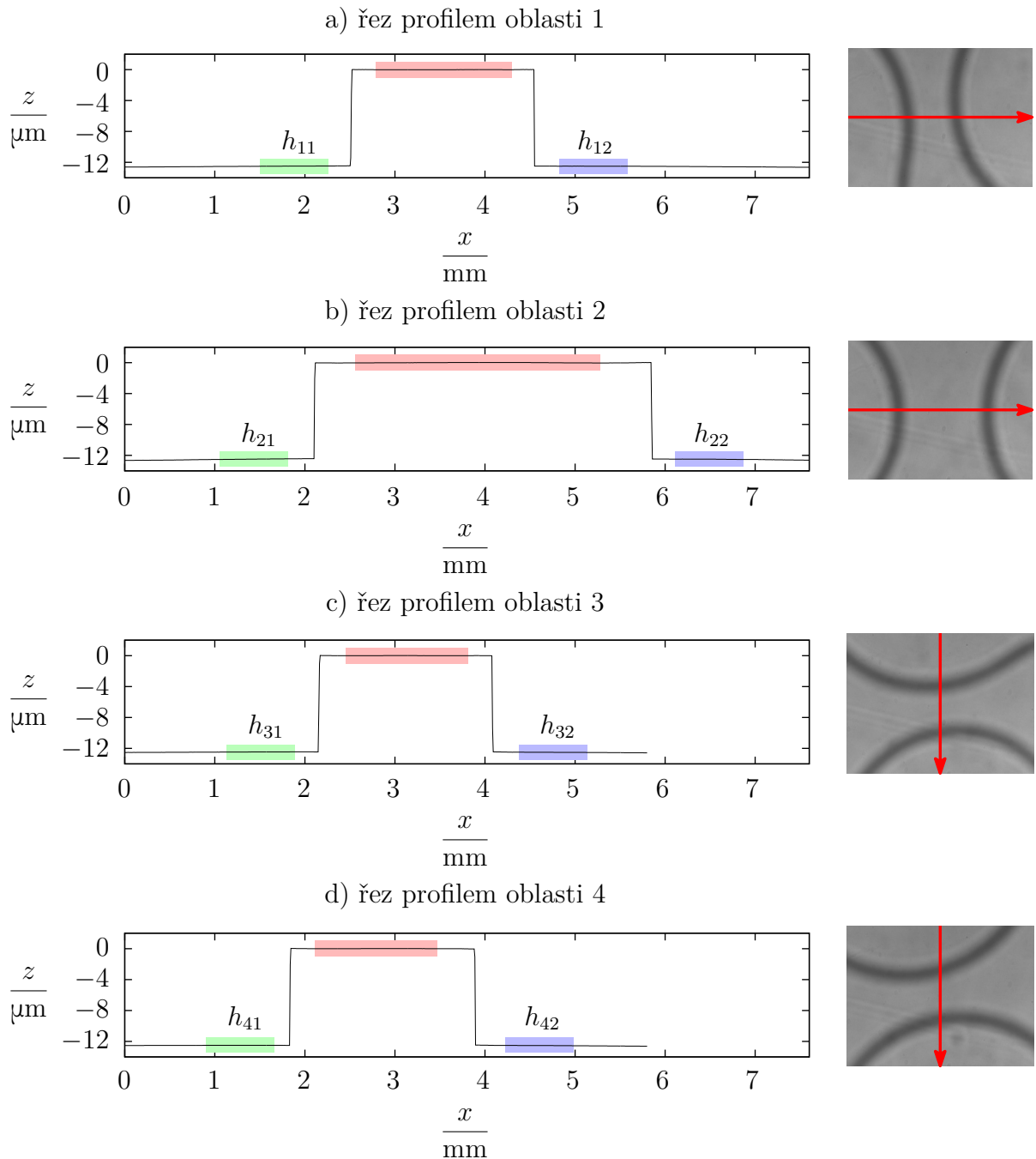
Obrázek 5.2: Naměřený profil části vzorku (viz obrázek 5.1) pomocí realizované sestavy.

5. MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ A SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM



Obrázek 5.3: Naměřené profily částí povrchu vzorku (viz obrázek 5.1) bez dalších úprav. Na obrázku b) je viditelné, že povrch není umístěn kolmo ke svazku, protože se svažuje, což lze snadno dodatečně odstranit např. odečtením roviny, kterou proložíme oblast, která má být vodorovná, od celého naměřeného povrchu. Z naměřených povrchů byly po zpracování vypočítány a vykresleny řezy (viz obrázek 5.4). Středů interferenčních proužků byly určeny pomocí korelační metody s využitím modelu vypočítaného ze spektra, přičemž vypočítaná vzájemná korelace byla fitována parabolou. V rovině $z = 0$ jsou vloženy snímky z kamery.

5.3. MĚŘENÍ HLOUBKY LEPTANÉ STRUKTURY



Obrázek 5.4: Řezy profily naměřenými pomocí realizované sestavy. Na obrázcích vpravo jsou vyznačeny řezy, viz obrázek 5.1. Červeně je zvýrazněna neleptaná část profilu, která byla proložena přímkou, která byla následně od celého profilu odečtena (takže střední hodnota výšky červeně zvýrazněné části je nulová). Zeleně a modře jsou pak vyznačeny ty části profilu, jejichž hloubky jsou porovnávány v tabulce 5.1.

5. MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ A SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM

Tabulka 5.1: Srovnání naměřených hodnot výšky schodů (viz obrázky 5.1 a 5.4) pro různé metody detekce středu interferenčního proužku. Nejistota je stanovena jako nejistota typu A z 12 měření.

metoda	$\frac{h_{11}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{21}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{31}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{41}}{\mu\text{m}}$
maximum signálu	$12,36 \pm 0,04$	$12,38 \pm 0,04$	$12,52 \pm 0,05$	$12,31 \pm 0,05$
těžiště maxim	$12,52 \pm 0,02$	$12,44 \pm 0,02$	$12,51 \pm 0,02$	$12,57 \pm 0,01$
korelace, model 1	$12,38 \pm 0,08$	$12,45 \pm 0,08$	$12,35 \pm 0,10$	$12,58 \pm 0,10$
korelace, model 1, fit	$12,47 \pm 0,02$	$12,45 \pm 0,02$	$12,47 \pm 0,04$	$12,46 \pm 0,04$
korelace, model 2	$12,33 \pm 0,07$	$12,41 \pm 0,06$	$12,25 \pm 0,05$	$12,60 \pm 0,05$
korelace, model 2, fit	$12,49 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,04$	$12,49 \pm 0,04$
fitování proužku, obálka	$12,48 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,03$	$12,52 \pm 0,03$
fitování proužku, maxima	$12,50 \pm 0,01$	$12,56 \pm 0,03$	$12,52 \pm 0,02$	$12,71 \pm 0,03$
FDA	$12,52 \pm 0,03$	$12,49 \pm 0,03$	$12,49 \pm 0,04$	$12,50 \pm 0,04$
FDA, interpolace	$12,49 \pm 0,02$	$12,46 \pm 0,02$	$12,45 \pm 0,04$	$12,41 \pm 0,04$
maximum obálky	$12,44 \pm 0,13$	$12,57 \pm 0,13$	$12,54 \pm 0,13$	$12,46 \pm 0,13$

metoda	$\frac{h_{12}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{22}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{32}}{\mu\text{m}}$	$\frac{h_{42}}{\mu\text{m}}$
maximum signálu	$12,46 \pm 0,01$	$12,51 \pm 0,01$	$12,51 \pm 0,02$	$12,53 \pm 0,02$
těžiště maxim	$12,48 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,56 \pm 0,02$
korelace, model 1	$12,47 \pm 0,04$	$12,43 \pm 0,04$	$12,42 \pm 0,09$	$12,47 \pm 0,09$
korelace, model 1, fit	$12,47 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,53 \pm 0,02$
korelace, model 2	$12,43 \pm 0,08$	$12,41 \pm 0,09$	$12,45 \pm 0,05$	$12,52 \pm 0,05$
korelace, model 2, fit	$12,46 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,03$	$12,53 \pm 0,03$
fitování proužku, obálka	$12,47 \pm 0,02$	$12,51 \pm 0,03$	$12,51 \pm 0,02$	$12,56 \pm 0,02$
fitování proužku, maxima	$12,46 \pm 0,01$	$12,50 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,01$	$12,54 \pm 0,02$
FDA	$12,46 \pm 0,02$	$12,50 \pm 0,02$	$12,52 \pm 0,04$	$12,56 \pm 0,04$
FDA, interpolace	$12,40 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,02$	$12,49 \pm 0,04$	$12,58 \pm 0,04$
maximum obálky	$12,51 \pm 0,16$	$12,48 \pm 0,16$	$12,55 \pm 0,07$	$12,64 \pm 0,07$

5.4. Nejistoty měření

Měření polohy každého bodu povrchu probíhalo tak, že nejprve byl v signálu z kamery nalezen střed interferenčního proužku a poté mu byla přiřazena poloha dle signálu z laserového interferometru. Nejistoty měření proto rozdělíme na nejistoty způsobené detekcí středu interferenčního proužku a způsobené měřením změny polohy měřicího zrcadla (kam spadá i měření indexu lomu vzduchu). Jelikož realizovaná sestava srovnává profil povrchu měřeného vzorku s profilem referenčního povrchu, pak i nízká rovinnost referenčního povrchu může přispívat k nejistotě měření.

5.4.1. Nejistota určení středu interferenčního proužku

Nejistota určení polohy měřicího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné, závisí na zvolené metodě detekce středu interferenčního proužku, na rychlosti pohybu měřicího zrcadla, poměru signálu vůči šumu a též na nastavení kompenzační desky (přesněji na tom, jak dokonale je kompenzována disperze). Vzhledem k měřením popsaným v části 3.5.2 byla pro vybranou metodu fitování proužku stanovena nejistota na 5 nm.

5.4.2. Nejistota indexu lomu vzduchu

U použité jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu, která byla použita pro měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu, je relativní nejistota měření teploty 3 %, vlhkosti 2 % a tlaku 1,7 % [21], u měření koncentrace oxidu uhličitého jsou to dle výrobce přístroje 2 % z rozsahu, který je u použitého senzoru 0,5 %.

Nejistota indexu lomu je závislá na konkrétní teplotě, tlaku, vlhkosti a koncentraci oxidu uhličitého a též na vlnové délce. Naměříme-li teplotu 22,0 °C, tlak 98 kPa, vlhkost 35,0 % a koncentraci CO₂ 0,30 % (což jsou běžné podmínky, které se během měření vyskytovaly), pak z naměřených údajů můžeme pro vlnovou délku 633 nm určit index lomu vzduchu $1,000\,261 \pm 0,000\,004$ (hodnota včetně nejistoty typu B byla vypočítána pomocí vytvořené funkce `air_index_edlen` pro MATLAB, která nejistotu typu B počítá dle zákona šíření nejistot, viz část 2.3.2).

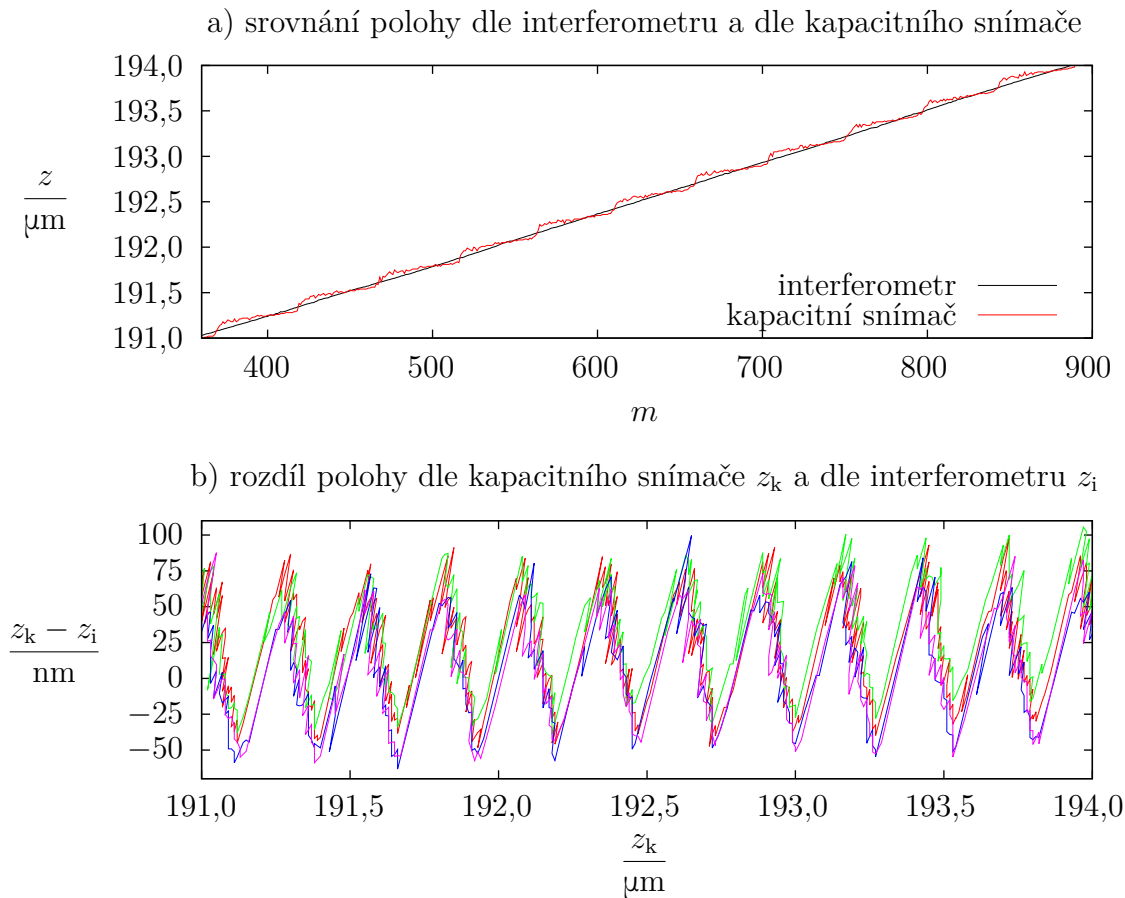
5.4.3. Nejistota měření polohy měřicího zrcadla

Pro určení změny polohy měřicího zrcadla během měření byl použit Michelsonův laserový interferometr, přičemž naměřený interferenční signál byl zpracováván postupem popsaným v části 2.2.3. Pro kontrolu naměřené vzdálenosti bylo možné použít údaj z kapacitního snímače polohy použitého piezo posuvu. Srovnání je uvedeno na obrázku 5.5a. Dle údaje z interferometru se povrch pohybuje přibližně konstantní rychlostí, dle kapacitního snímače však nikoliv. Z grafu na obrázku 5.5b, který ukazuje velikost rozdílu pro různá měření provedená dvěma různými rychlostmi měřicího zrcadla, je zřejmé, že velikost skoku a ani jeho poloha nezávisí na rychlosti.

Pokud by se měřicí zrcadlo skutečně pohybovalo tak, jak měří kapacitní snímač, bylo by to patrné na signálu z laserového interferometru. Bylo provedeno měření, při kterém byla zaznamenávána poloha určená pomocí kapacitního snímače a napětí na fotodetektoru, které je úměrné intenzitě na výstupu laserového interferometru, přičemž záznam byl proveden s velkou vzorkovací frekvencí, řádově 10³ vzorků na periodu interferenčního signálu. Naměřený signál je uveden na obrázku 5.6. Pokud by se měřicí zrcadlo

5. MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ A SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM

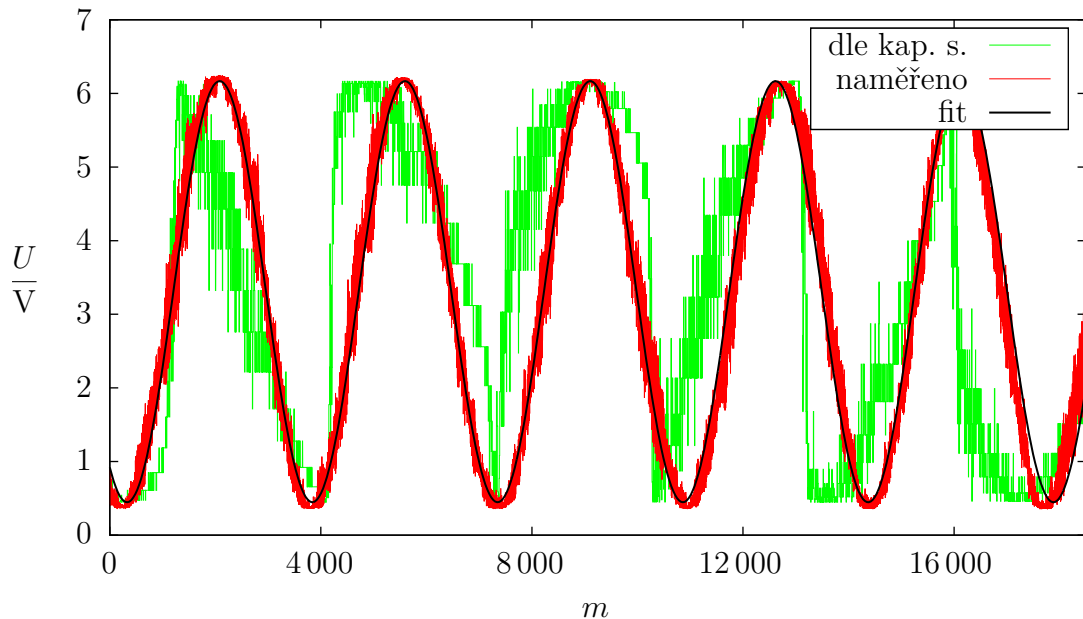
pohybovalo konstantní rychlostí, pak by dle rovnice (2.1) závislost napětí na čísle vzorku m byla $U(m) = A \cos(km + \varphi_0) + U_0$, kde A , k , φ_0 a U_0 jsou reálné konstanty. Touto funkcí byla naměřená data fitována. Z obrázku 5.6 je zřejmé, že naměřená data této funkci odpovídají, avšak perioda se během záznamu mění, což je způsobeno tím, že rychlost měřícího zrcadla se během měření měnila (při záznamu na obrázku 5.6 se snižovala). Dle rovnice (2.1) byl též pro porovnání vypočítán signál, který by byl naměřen, pokud by se měřící zrcadlo pohybovalo tak, jak měří kapacitní snímač. Z obrázku 5.6 je pak zřejmé, že poloha naměřená kapacitním snímačem neodpovídá skutečnému pohybu měřícího zrcadla interferometru.



Obrázek 5.5: a) srovnání údajů o poloze měřícího zrcadla naměřeného pomocí Michelsonova laserového interferometru s údajem z kapacitního snímače piezo posuvu; b) závislost rozdílu obou údajů na poloze dle kapacitního snímače piezo posuvu pro čtyři různá měření provedená dvěma rychlostmi měřícího zrcadla.

Proložíme-li pomocí kapacitního snímače naměřenou závislost polohy na čísle snímku polynomem nízkého stupně, pak se na vzdálenosti, kterou měřící zrcadlo interferometru během měření urazilo (a která byla během většiny měření popisovaného vzorku přibližně $30 \mu\text{m}$), údaj o změně polohy z kapacitního snímače lišil od údaje změřeného pomocí laserového interferometru během provedených měření vždy asi o 110 nm . Proto bylo provedeno měření na delší vzdálenosti asi $150 \mu\text{m}$. Na této vzdálenosti se údaj z interferometru lišil od údaje z kapacitního snímače o asi 560 nm , což je více než polovina vlnové délky laseru (a tedy více než přesnost laserového interferometru v případě použití nejhrušší metody detekce – počítání proužků), a tedy (vzhledem k malé nejistotě indexu lomu)

bylo potvrzeno, že polohu měřícího zrcadla změřenou pomocí kapacitního snímače piezo posuvu lze při provedených měřeních brát pouze jako orientační údaj.



Obrázek 5.6: Signál z detektoru laserového interferometru (napětí na fotodetektoru úměrné intenzitě) fitovaný teoretickou závislostí (za předpokladu, že by se měřící zrcadlo pohybovalo konstantní rychlostí). Pro srovnání je v grafu též zobrazeno, jaký signál by byl naměřen, jestliže by se měřící zrcadlo pohybovalo tak, jak měří kapacitní snímač piezo posuvu (viz obrázek 5.5). Na základě tohoto měření (a obdobných provedených při jiných rychlostech měřícího zrcadla) bylo zjištěno, že rychlost měřícího zrcadla není během měření konstantní, avšak mění se plynule, nikoliv tak, jak měří kapacitní snímač.

Nejistota detekce polohy měřícího zrcadla byla vzhledem k šumu v měřeném signálu (viz obrázek 5.6) a malé vzorkovací frekvenci při provedených měřeních stanovena na 20 nm. Nejistota způsobená nejistotou měření indexu lomu vzduchu je pak při provedených měřeních řádově menší, tudíž zanedbatelná.

5.4.4. Rovinnost referenčního povrchu

Protože přesnost detekce profilu povrchů závisí na rovinnosti referenčního povrchu, vůči kterému profil povrchu vzorku měříme, byla jeho rovinnost změřena.

Do větve interferometru obsahující vzorek bylo místo vzorku vloženo zrcadlo Thorlabs BB2-E02 s rovinností $\lambda/10$ na vlnové délce $\lambda = 633$ nm, byl vypnut zdroj bílého světla a z detekční části pro bílé světlo odebrán filtr. Na kameře pak bylo možné pozorovat interferenci laserového záření. Naměřený obrazec je uveden na obrázku 5.7a. Při zkrácení větve interferometru obsahující referenční povrch se proužky sbíhaly, povrch má tedy dutý tvar. Mezi dvěma sousedními maximy (světlými proužky) se výška povrchu změnila o polovinu vlnové délky, tedy asi o 316 nm.

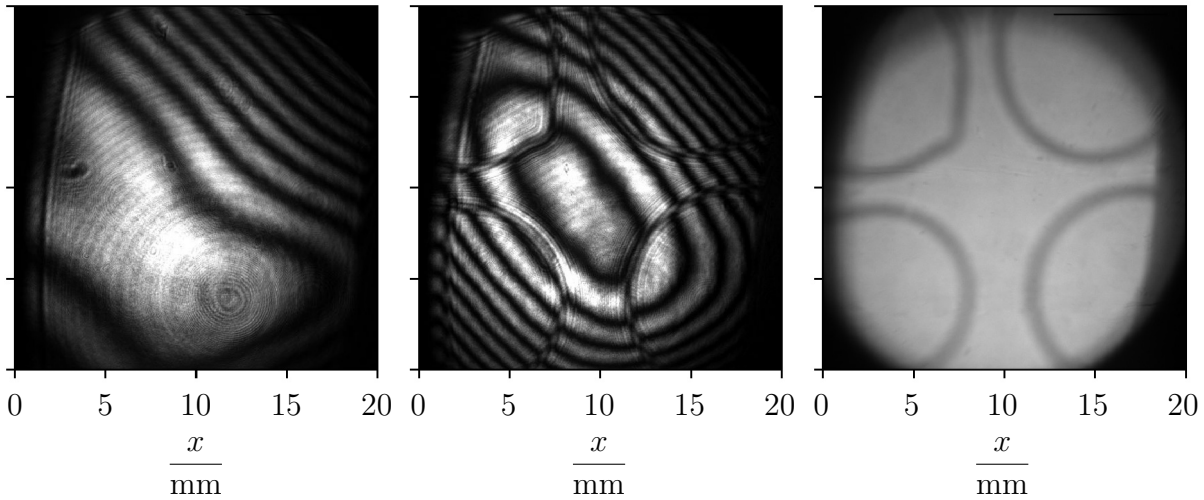
Na obrázku 5.7c je pro srovnání obrázek měřeného vzorku ve stejném měřítku. Pro srovnání s referenčním měřením byly vždy měřeny jen malé části povrchu (viz obrázek 5.1), takže chyba způsobená nerovností referenční plochy je menší než v případě, kdy by se používal svazek celý.

5. MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ A SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM

a) referenční povrch

b) referenční povrch, vzorek

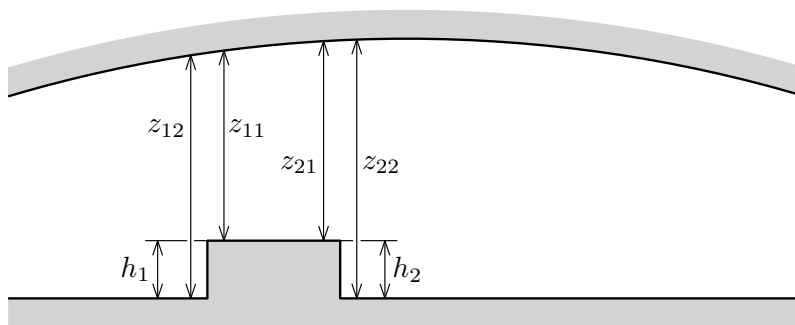
c) vzorek, bílá LED



Obrázek 5.7: a) měření rovinnosti referenčního povrchu pomocí Michelsonova laserového interferometru, v jehož jedné větvi byla měřená referenční plocha a v druhé zrcadlo s vysokou rovinností; b) totéž bez zrcadla s měřeným vzorkem; c) pro srovnání obrázků měřeného vzorku.

Na obrázku 5.7b je též obrázek z výstupu interferometru při použití laseru, avšak místo zrcadla je použit měřený povrch. Vidíme, že i měřený vzorek je prohnutý, dle chování interferenčních proužků při malé změně polohy referenčního povrchu bylo zjištěno, že je též dutý.

Nejistota způsobená nedokonalostí referenčního povrchu závisí na tom, jak velkou část vzorku měříme. Pro srovnání s referenčním měřením byly měřeny rozdíly výšek dvou bodů, které jsou na měřeném povrchu vzdáleny asi 1 mm. Podle polohy bodů, rozdíl jejichž výšek chceme měřit, můžeme vlivem malé rovinnosti referenčního povrchu naměřit vyšší či nižší hodnotu než je hodnota skutečná (viz obrázek 5.8). Nejistota byla na základě měření rovinnosti referenčního povrchu stanovena na 50 nm.



Obrázek 5.8: Při měření na realizované sestavě měříme rozdíl profilu povrchu vzorku a profilu referenčního povrchu (o němž předpokládáme, že je rovinný). Nízká rovinnost referenčního povrchu tak způsobuje nejistotu měření výšky. Na obrázku je znázorněna dutá referenční plocha, vůči které profil povrchu vzorku měříme, a rovinný povrch se strukturou vysokou $h_1 = h_2$. Kvůli prohnutí plochy, vůči které měříme profil povrchu, bude v případě měření výšky h_1 jako rozdílu $z_{12} - z_{11}$ výška h_1 změřena jako nižší než skutečná, kdežto výška h_2 , kterou měříme jako rozdíl $z_{22} - z_{21}$, vyšší než skutečná.

Nejistotu by bylo možné snížit použitím povrchu, u kterého je vysoká rovinnost garantována (např. použitá zrcadla Thorlabs BB2-E02). Při použití povrchu z jiného materiálu bychom však museli při detekci středu interferenčního proužku řešit problém s disperzí (viz obrázek 3.3) a zvýšila by se nejistota určení středu interferenčního proužku, tedy i celková nejistota měření.

Dalšími zdroji nejistot v případě měření profilu povrchů jsou nehomogenity indexu lomu děliče a kompenzační desky a nedokonalost jejich tvaru. Např. pokud by kompenzační deska v realizované sestavě měla místo s vyšším indexem lomu, pak by v příslušné části svazku byla optická dráha v této větvi delší, a tedy na povrchu by byla naměřena prohlubeň, která na něm ve skutečnosti není. Stejná situace by nastala, jestliže by v tomto místě měla kompenzační deska větší tloušťku. Pokud by úhel klínu kompenzační desky nebyl stejný jako úhel klínu děliče, pak by nastala stejná situace jako v případě, že kompenzační deska není optimálně umístěna, a tedy při použití metod detekce středu interferenčního proužku odolných vůči disperzi by nedošlo k deformaci měřeného povrchu.

Pro určení hodnoty nejistoty způsobené uvedenými chybami optických komponent by bylo třeba znát přesněji jejich parametry. Odhad je možné udělat stejným způsobem jako v případě měření rovinnosti referenčního povrchu, jestliže do obou větví interferometru vložíme zrcadla s vysokou rovinností. Toto měření bylo provedeno a nebyly pozorovány na celé ploše svazku žádné proužky, a tedy nejistota způsobená nedokonalostí optických komponent bude řádově menší než nejistota způsobená rovinností referenční plochy, bude proto zanedbána.

Uvedené nejistoty způsobené vadami děliče svazku, kompenzační desky a referenční plochy je možné snížit měřením vzorku s vysokou rovinností. Jestliže pak povrch takto naměřený odečteme od každého dalšího naměřeného povrchu při stejném nastavení interferometru, snížíme tím nejistotu způsobenou uvedenými vadami řádově na hodnotu rovinnosti povrchu použitého k této korekci.

5.4.5. Celková nejistota měření

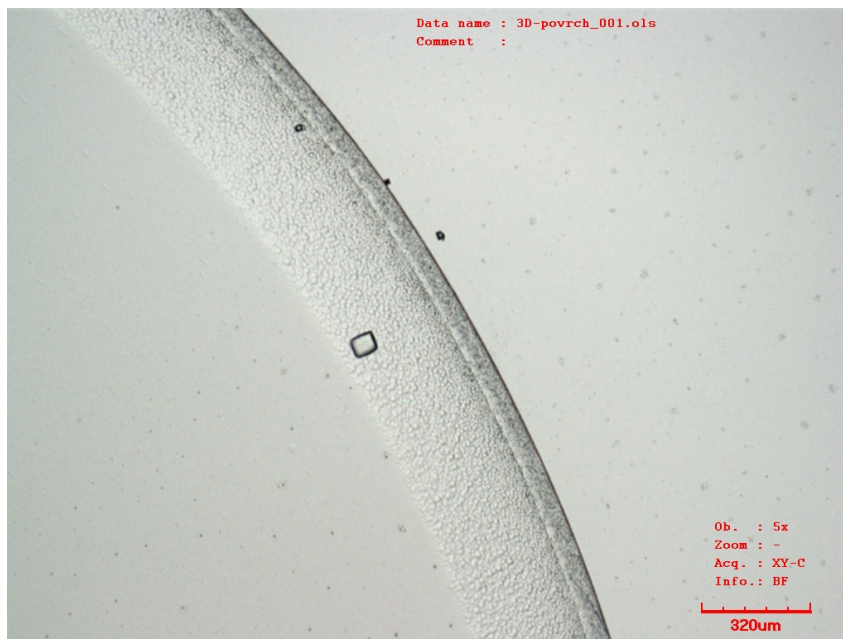
K celkové nejistotě měření v realizovaném experimentu přispívá zejména nejistota měření změny polohy měřicího zrcadla (stanovena na 20 nm) a také nízká rovinnost referenční plochy (nejistota stanovena na 50 nm). Celková nejistota typu B měření hloubky struktury vyleptané do povrchu v blízkosti jejího okraje byla stanovena na 80 nm. Z tabulky 5.1 je pak zřejmé, že v případě vhodně zvolené metody detekce středu interferenčního proužku je nejistota typu A mnohem menší, celková nejistota je tedy 80 nm.

Pro přesnější měření by bylo třeba použít jinou metodu měření polohy měřicího zrcadla, např. interferometr s homodynňí detekcí, a zejména jakožto referenční povrch použít povrch s vysokou rovinností (nikoliv však z odlišného materiálu, což by zvedlo nejistotu určení středu interferenčního proužku).

5.5. Srovnání s referenčním měřením

5.5.1. Konfokální mikroskop

Měřený vzorek byl snímán na konfokálním mikroskopu (viz obrázek 5.9), ten však při nejmenším zvětšení měl rozlišení v ose z pouze $6\ \mu\text{m}$, tedy asi polovinu výšky schodu. Proto se povrch jevil téměř jako rovný a nebylo možné určit výšku schodu. Při použití jiného objektivu (kde by rozlišení bylo vyšší) bylo zorné pole menší než je šířka schodu, nebylo tedy možné získat snímek, na kterém by byla zároveň neleptaná i leptaná plocha. Snímek s konfokálního mikroskopu bylo možné použít ke zjištění délky schodu a pro přibližné stanovení měřítka obrazu na kameře.



Obrázek 5.9: Snímek měřeného povrchu z konfokálního mikroskopu. Při použití objektivu, u kterého bylo dostatečně široké zorné pole (a tedy byla viditelná zároveň leptaná i neleptaná část povrchu) bylo rozlišení mikroskopu příliš malé na to, aby bylo možné určit hloubku vyleptané struktury.

5.5.2. Profilometr

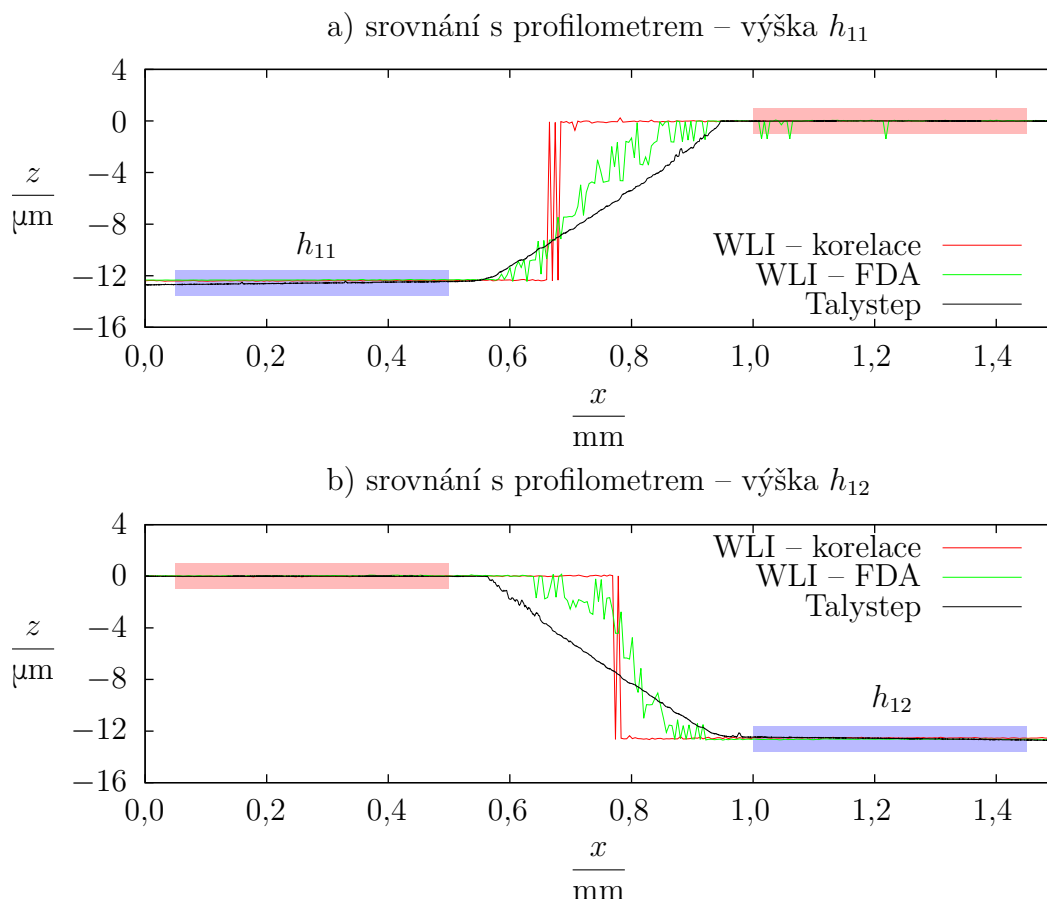
Vzorek byl měřen na profilometru Taylor Hobson Talystep. Ten umožňuje získat profil povrchu podél oblouku o malé křivosti, který budeme dále považovat za úsečku. Pro srovnání byla vybrána část povrchu na obrázku 5.1 označená číslem 1, s referenčním měřením tedy byly srovnávány hloubky h_{11} a h_{12} , viz obrázek 5.10.

Výrobce profilometru udává na použitém rozsahu nejistotu 1 %. Měření bylo provedeno na každém místě třikrát, přičemž rozdíl naměřených hodnot byl řádově menší než udávaná nejistota. S ohledem na udávanou nejistotu byly výšky obou schodů h_{11} a h_{12} na obrázku 5.10 změřeny pomocí profilometru shodně jako $(12,5 \pm 0,1)\ \mu\text{m}$.

Pomocí realizované sestavy byly při vyhodnocování pomocí metody fitování proužku s následnou detekcí maxima obálky (která byla vybrána jako optimální pro zpracování provedených měření, viz část 3.6) změřeny hloubky struktur $h_{11} = (12,48 \pm 0,08)\ \mu\text{m}$ a $h_{12} = (12,47 \pm 0,08)\ \mu\text{m}$ (viz naměřené hodnoty v tabulce 5.1 a diskuse nejistot měření v části 5.4.5). V rámci nejistot měření se tedy hodnoty naměřené pomocí profilometru

5.5. SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM

shodují s hodnotami naměřenými pomocí realizované sestavy. Nejistota měření pomocí profilometru a také nejistoty měření na realizované sestavě jsou však příliš velké na to, aby bylo možné zhodnotit a porovnat přesnost jednotlivých metod detekce středu interferenčního proužku i na základě provedených měření hloubky leptané struktury.



Obrázek 5.10: Srovnání profilů naměřených pomocí realizované sestavy s profily naměřenými na profilometru Talystep. Porovnávány byly hloubky h_{11} a h_{12} (vyznačené modře) leptané části vzorku (neleptaná část vzorku je vyznačena červeně). V rámci nejistot měření jsou hodnoty naměřené pomocí realizované sestavy shodné s hodnotami naměřenými pomocí profilometru. Z grafů je též patrné, že metoda FDA v případě, kdy v signálu dojde k interferenci dvakrát (k čemuž dochází v blízkosti hran, viz obrázek 3.8) detekuje proužek v místech, kde ve skutečnosti není. Vzhledem k mírné divergenci svazku a malé odrazivosti přechodu mezi leptaným a neleptaným povrchem, je pozvolné klesání detekováno jako ostrý schod, jeho výška je však změřena správně.

5. MĚŘENÍ PROFILU POVRCHŮ A SROVNÁNÍ S REFERENČNÍM MĚŘENÍM

Závěr

Cílem práce bylo seznámit se se základními principy interferometrických měření, navrhnout a realizovat experimentální sestavu pro optické měření profilu povrchů kombinující možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence, na realizované sestavě provést měření profilu povrchů, naměřená data vyhodnotit a výsledky srovnat s referenčním měřením.

Byla teoreticky popsána interference a některé druhy laserových interferometrů. Byly popsány přímé i nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu. Na základě popisu nepřímých metod byla vytvořena funkce pro prostředí MATLAB na výpočet indexu lomu vzduchu na základě měření teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a koncentrace CO_2 , a to včetně jeho nejistoty. Dále byly popsány metody měření vzdálenosti pomocí Michelsonova laserového interferometru.

Byl popsán princip interferometrie nízké koherence včetně oblastí použití a princip Michelsonova interferometru v interferometrii nízké koherence a jeho využití pro analýzu profilu povrchů.

Byl vypracován přehled metod detekce středu interferenčního proužku v interferometrii nízké koherence, které analyzují závislost intenzity na výstupu interferometru na poloze měřicího zrcadla, a je tedy možné je použít pro zpracování dat naměřených na realizované sestavě. Metody byly implementovány jako funkce do prostředí MATLAB. Na základě měření spektra použitého zdroje bílého světla byl vytvořen model interferenčního proužku pro korelační metodu, při jehož použití byla detekce přesnější. Dále byla provedena úprava této metody, která vede k její částečné odolnosti vůči disperzi v případě neoptimálního nastavení klínové kompenzační desky.

Na základě principů popsaných v první polovině práce byla navržena experimentální sestava pro optické měření profilu povrchů, která kombinuje možnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. Sestava byla realizována v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.

Na základě dat naměřených na realizované sestavě byly metody detekce středu interferenčního proužku srovnány. Jednalo o srovnání jejich rychlosti, odolnosti vůči disperzi (v případě použití klínového děliče a kompenzační desky) a přesnosti detekce povrchu známého tvaru (roviny) v závislosti na vzorkovací frekvenci. Odolnost vůči disperzi byla testována i pomocí numerické simulace, při které bylo zjištěno, že neoptimální nastavení klínové kompenzační desky interferometru nezpůsobí v případě použití metod odolných vůči disperzi deformaci měřeného povrchu, pouze jeho otočení. Na základě měření a numerické simulace byla pro zpracování profilu povrchů měřených na realizované sestavě vybrána metoda fitování části naměřeného signálu jeho modelem a detekce maxima jeho obálky, která pro provedená měření byla dostatečně přesná, odolná vůči disperzi, zároveň velmi rychlá.

Na realizované sestavě byla provedena měření profilu povrchů a naměřená data byla zpracována pomocí skriptů a funkcí vytvořených v prostředí MATLAB. Měření některých

ZÁVĚR

částí povrchu vzorku byla opakována, na základě čehož byla určena nejistota typu A měření hloubky struktur vyleptaných na měřeném povrchu, a to pro všechny popsané metody detekce středu interferenčního proužku. Byly diskutovány také nejistoty typu B provedených měření, zejména nejistoty určení středu interferenčního proužku a polohy měřicího zrcadla interferometru a také nejistoty způsobené nedokonalostí optických komponent a referenčního povrchu. Některé hodnoty naměřené pomocí realizované sestavy byly srovnány s referenčním měřením na profilometru, přičemž v rámci nejistot měření se hodnoty změřené na realizované sestavě shodovaly s hodnotami změřenými na profilometru.

Literatura

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] SUHR, Wilfried a H. Joachim SCHLICHTING. Coloured rings produced on transparent plates. *Physics Education*. 2007, vol. 42, no. 6, s. 566–571. Dostupné z: doi: 10.1088/0031-9120/42/6/001. ISSN 0031-9120.
- [3] ČÍP, Ondřej a Zdeněk BUCHTA. *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie* [online]. 2011 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf.
- [4] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of photonics*. New York: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 0-471-83965-5.
- [5] NOVOTNÝ, Peter. *Zpracování signálů v interferometrii nízké koherence*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Marie HAVLÍKOVÁ.
- [6] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of Optics*. 7. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-521-64222-1.
- [7] RÝC, Jan. *Michelsonův interferometr*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Zdeněk HAVRÁNEK.
- [8] EDLÉN, Bengt. The Refractive Index of Air. *Metrologia*. 1966, vol. 2, no. 2, s. 71–80. Dostupné z: doi: 10.1088/0026-1394/2/2/002. ISSN 1681-7575.
- [9] BIRCH, K. a M. DOWNS. Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. *Metrologia*. 1994, vol. 31, no. 4, s. 315–316. Dostupné z: doi: 10.1088/0026-1394/31/4/006. ISSN 1681-7575.
- [10] MUIJLWIJK, R. Update of the Edlén Formulae for the Refractive Index of Air. *Metrologia*. 1988, vol. 30, no. 3, s. 155. Dostupné z: doi: 10.1088/0026-1394/30/3/004. ISSN 1681-7575.
- [11] BÖNSCH, G. a E. POTULSKI. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. *Metrologia*. 1998, vol. 35, no. 2, s. 133–139. Dostupné z: doi: 10.1088/0026-1394/35/2/8. ISSN 1681-7575.
- [12] BUCHTA, Zdeněk, Břetislav MIKEL, Josef LAZAR a Ondřej ČÍP. White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera. *Measurement Science and Technology*. 2011, vol. 22, no. 9. Dostupné z: doi: 10.1088/0957-0233/22/9/094031. ISSN 0957-0233.

LITERATURA

- [13] MEDICUS, Kate, Anneliese FRICKE, John BRODZIAK a Angela DAVIES. The Effect of Phase Change on Reflection on Optical Measurements. *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements*. 2005, no. 5879, s. 61–72. Dostupné z: doi: 10.1117/12.614515.
- [14] DOI, Takuma, Kouji TOYODA a Yoshihisa TANIMURA. Effects of phase changes on reflection and their wavelength dependence in optical profilometry. *Applied Optics*. 1997, vol. 36, no. 28, s. 7157–7161. Dostupné z: doi: 10.1364/AO.36.007157. ISSN 2155-3165.
- [15] PARK, Min-Cheol a Seung-Woo KIM. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms. *Optical Engineering*. 2000, vol. 39, no. 4, s. 952–959. Dostupné z: doi: 10.1117/1.602445. ISSN 0091-3286.
- [16] de GROOT, Peter a Leslie DECK. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain. *Journal of Modern Optics*. 1995, vol. 42, no. 2, s. 389–401. Dostupné z: doi: 10.1080/09500349514550341. ISSN 1362-3044.
- [17] PAWŁOWSKI, Michał, Youhei SAKANO, Yoko MIYAMOTO a Mitsuo TAKEDA. Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis. *Optics Communications*. 2006, vol. 260, no. 1, s. 68–72. Dostupné z: doi: 10.1016/j.optcom.2005.10.013. ISSN 0030-4018.
- [18] TIAN, Ailing, Wang CHUNHUI, Jiang ZHUANGDE, Wang HONGJUN a Liu BINGCAI. Study on key algorithm for scanning white-light interferometry. In: *Ninth International Symposium on Laser Metrology*. Singapore: Proceedings of the SPIE, 2008. Dostupné z: doi: 10.1117/12.814597. ISBN 978-0-8194-7398-1.
- [19] PAVLÍČEK, Pavel a Václav MICHÁLEK. White-light interferometry—Envelope detection by Hilbert transform and influence of noise. *Applied Optics*. 2002, vol. 51, no. 4, s. 465–473. Dostupné z: doi: 10.1364/AO.51.000465. ISSN 1559-128X.
- [20] LARKIN, Kieran G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *Journal of the Optical Society of America A*. 1996, vol. 13, no. 4, s. 832–843. Dostupné z: doi: 10.1364/JOSAA.13.000832. ISSN 1084-7529.
- [21] HUCL, Václav. *Jednotka pro monitorování hodnoty indexu lomu vzduchu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Zdeněk HAVRÁNEK.

Seznam použitých zkratek a symbolů

a.u.	arbitrary unit (relativní jednotka)
$\arg z$	argument komplexního čísla z
c	rychlost světla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_0	rychlost světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Δd	rozdíl tloušťek skla ve větvích interferometru [m]
f	frekvence [s^{-1}]
f'	obrazová ohnisková vzdálenost [m]
FDA	frequency domain analysis (analýza ve frekvenční oblasti)
FFT	fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
$\mathcal{F}\{f(x)\}$	Fourierova transformace funkce $f(x)$
$\mathcal{H}\{f(x)\}$	Hilbertova transformace funkce $f(x)$
$\text{int } x$	dolní celá část x pro $x \geq 0$, horní celá část x pro $x < 0$
I	intenzita [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
k	vlnové číslo [m^{-1}]
l_c	koherenční délka [m]
LCI	low-coherence interferometry (interferometrie nízké koherence)
n	index lomu
m	číslo vzorku
OPD	optical path difference (rozdíl optických drah)
Ra	střední aritmetická úchylka [m]
\mathcal{S}	výkonová spektrální hustota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$]
$u(\mathbf{r}, t)$	vlnová funkce polohy \mathbf{r} a času t
$U(\mathbf{r}, t)$	komplexní vlnová funkce polohy \mathbf{r} a času t
$U(\mathbf{r})$	komplexní amplituda vlny v místě \mathbf{r}

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

U	napětí na fotodetektoru (úměrné intenzitě) [V]
\mathcal{V}	viditelnost proužků
VNC	virtual network computing
WLI	white light interferometry (bílá interferometrie)
x, y	souřadnice v rovině vzorku [m]
z	souřadnice kolmá na rovinu vzorku [m]
λ	vlnová délka [m]
σ	vlnočet [m^{-1}]
τ_c	koherenční doba [s]
φ	fáze [rad]
ω	úhlová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
$f(x) \star g(x)$	vzájemná korelace funkcí $f(x)$ a $g(x)$
$\langle x \rangle$	střední hodnota veličiny x
\bar{x}	průměrná hodnota veličiny x
z^*	komplexní sdružení komplexního čísla z

Seznam příloh

Skripty a funkce pro prostředí MATLAB

- Analýza profilu povrchů
 - `surf_analysis` – ukázkový skript pro zpracování dat při analýze profilu povrchů pomocí realizované sestavy využívající níže jmenované funkce
- Index lomu vzduchu
 - `air_index_edlen` – z teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a koncentrace CO_2 vypočítá index lomu vzduchu včetně nejistoty (dle zadaných údajů určí nejistotu typu A, nejistotu typu B, popř. kombinovanou nejistotu, viz část 2.3.2)
- Laserová interferometrie
 - `interf2pos` – vypočítá změnu polohy měřícího zrcadla Michelsonova interferometru během měření na základě vlnové délky laseru a interferenčního signálu (viz část 2.2.3)
- Detekce středu interferenčního proužku v interferometrii nízké koherence (viz 3.4)
 - `wli_corr_gauss` – korelační metoda, model z [5]
 - `wli_corr_gauss_fit` – jako předchozí, fitování korelace parabolou
 - `wli_corr_spectrum` – korelační metoda, model ze spektra zdroje
 - `wli_corr_spectrum_fit` – jako předchozí, fitování korelace parabolou
 - `wli_fda` – analýza ve frekvenční oblasti
 - `wli_fda_interp` – jako předchozí, před výpočtem interpoluje hodnoty
 - `wli_env_hilb` – obálka vypočítaná pomocí Hilbertovy transformace
 - `wli_qfit` – fitování proužku pomocí modelu
 - `wli_qfit_env` – stejné jako předchozí, detekuje maximum obálky
 - `wli_weight_center` – vážený průměr poloh maxim a minim
- Model interference bílého světla
 - `whitesim_fringe` – vypočítá na základě parametrů zdroje (střední vlnové délky a koherenční délky, popř. spektra) podobu interferenčního proužku
 - `whitesim_dispersion` – simuluje vliv disperze na tvar interferenčního proužku a na měření profilu povrchů

Součástí příloh jsou také dva soubory s příklady naměřených dat (se sníženým rozlišením), které je možné spuštěním skriptu `surf_analysis` zpracovat (pomocí kterékoliv z jmenovaných metod detekce středu interferenčního proužku) a vykreslit profily měřených povrchů.