

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Mapovanie mikroskopického povrchu s využitím
interferencie polarizovaného odrazeného svetla



Katedra optiky

Vypracoval: **Bc. Rastislav Imrich Švihra**

Vedúci bakalárskej práce: **RNDr. Ing. Jan Podloucký**

Študijný program: B1701 – Fyzika

Študijný odbor: Digitální a přístrojová optika

Forma štúdia: prezenčná

Rok odovzdania: 2020

Prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu spracoval samostatne pod vedením pána RNDr. Ing. Jana Podlouckého a všetky použité zdroje som uviedol v zozname literatúry.

V Olomouci dňa

.....

podpis

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKÁCIA

Autor: Bc. Rastislav Imrich Švihra

Názov práce: Mapovanie mikroskopického povrchu s využitím interferencie polarizovaného odrazeného svetla

Typ práce: Diplomová práca

Pracovisko: Katedra optiky

Vedúci práce: RNDr. Ing. Jan Podloucký

Rok obhajoby práce: 2020

Abstrakt: Diplomová práca sa zaoberá princípom mapovania mikroskopického povrchu a využitia interferometrie s fázovým posunom pre bezkontaktné meranie. Je diskutované použitie optických zostáv s mechanicky pohyblivými komponentami a bez, pričom nepohyblivé komponenty sú použité v experimente v praktickej časti práce. Cieľom práce je experimentálne overiť použitie wire grid polarizátoru ako deliča zväzku v Mirau interferometri a variabilného retardéru z tekutých kryštálov pre zavedenie fázového posunu medzi interferujúcimi vlnami. Na záznam a jeho spracovanie je použitý program MATLAB.

Kľúčové slová: mapovanie povrchu, mikroskopia, interferencia, polarizácia, Mirau interferometer

Počet strán: 42

Jazyk: slovenský

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author: Bc. Rastislav Imrich Švihra

Title: Mapping of microscopic surface using interference of polarized reflected light

Type of thesis: Master

Department: Department of Optics

Supervisor: RNDr. Ing. Jan Podloucký

The year of presentation: 2020

Abstract: The thesis deals with the principle of microscopic surface mapping and the use of phase-shifting interferometry for non-contact measurement. The discussion in theoretical part includes details about differences between non-motionless and motionless mechanical components, while the motionless components are then used for the experiment presented in the practical part of the thesis. The aim of this work is to experimentally verify the use of a wire grid polarizer as a beamsplitter in a Mirau interferometer and a liquid crystal variable retarder to introduce a phase-shift between interfering waves. The MATLAB program is used for recording and data processing.

Key words: surface mapping, microscopy, interference, polarization, Mirau interferometer

Number of pages: 42

Language: Slovak

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel pod'akovať vedúcemu tejto práce pánovi RNDr. Ing. Janovi Podlouckému za všetku pomoc, cenné rady a asistenciu v laboratóriu pri vedení tejto diplomovej práce.

Obsah

Úvod	7
1 Teoretická časť	8
1.1 Typy interferometrov	9
1.1.1 Použitie interferometrov pre mapovanie mikroskopického povrchu	11
1.2 Záznam a jeho spracovanie	13
1.2.1 Použitie interferometrie s fázovým posunom	14
1.2.2 Praktická realizácia fázového posunu medzi vlnami	16
1.3 Využitie wire grid polarizátoru ako deliča zväzku	19
1.4 Variabilný retardér z tekutých kryštálov	20
1.5 Simulácia interferencie vln a rekonštrukcia fázového rozdielu	22
2 Experimentálna časť	25
2.1 Použitá experimentálna zostava	25
2.2 Kalibrácia variabilného retardéru z tekutých kryštálov	29
2.3 Numerická rekonštrukcia obrazu povrchu	32
2.4 Experimentálne záznamy	33
2.4.1 USAF 1951 test	33
2.4.2 Difrakčná mriežka	36
2.4.3 Gulička	37
Záver	41
Literatúra	41

Úvod

S vývojom nových technológií a miniaturizáciou zariadení prišla aj potreba precízne a čo najrýchlejšie kontrolovať vyrobené mikroskopické súčiastky. Na kontrolu kvality ich povrchu sa používajú kontaktné a bezkontaktné (optické) metódy [1]. Kontaktné metódy zahŕňajú skenovanie mikroskopovou sondou, ktorá postupne prechádza po meranom povrchu a zaznamenávajú sa jej vertikálne odchýlky. Nevýhodou je horšia časová náročnosť merania a mechanické poškodenie meraného povrchu hrotom sondy. Taktiež sa od veľkosti hrotu sondy odvíjajú možné artefakty na ostrých hranách predmetu.

Bezkontaktné metódy využívajú interferometer, kde signálna vlna je odrazená od pozorovaného povrchu a referenčnú sa snažíme čo najlepšie zachovať. Používajú sa rôzne usporiadania interferometrov a ich kombinácie s mikroskopovými objektívmi pre mapovanie povrchu o malých rozmeroch [2], ktorých vlastnosti budú diskutované v teoretickej časti práce. Ďalej bude vysvetlený princíp a použitie interferometrie s fázovým posuvom, ktorá má široké uplatnenie pri optických kontrolách tvaru povrchu.

V experimentálnej časti práce bude otestovaná optická zostava s polarizačným Mirau interferometrom, kde ako delič zväzku bude použitý polarizátor z drôtenej mriežky. Pre zavedenie fázového posuvu bez mechanicky pohyblivých komponentov bude použité anizotropné optické prostredie. Podobná metóda bola už navrhnutá a experimentálne overená s dosiahnutím vysokej presnosti merania [3].

Kapitola 1

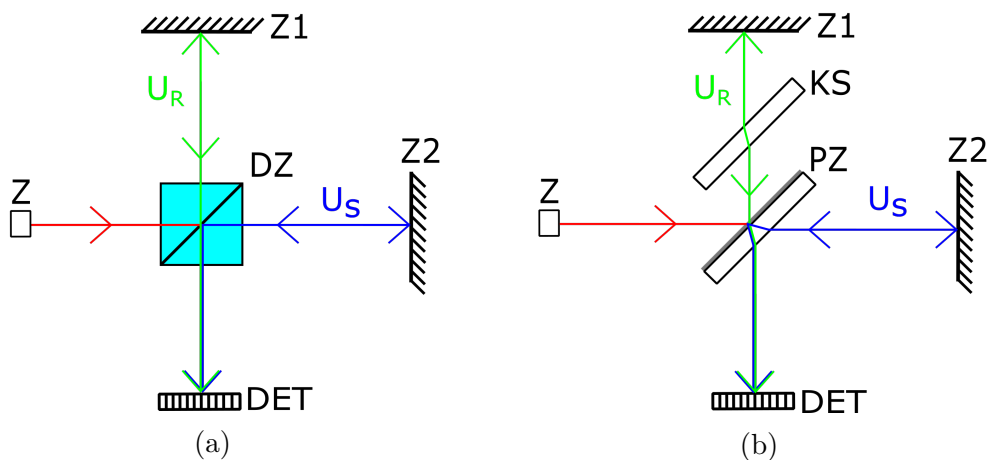
Teoretická časť

Táto práca bude zameraná na bezkontaktné optické metódy mapovania povrchu s využitím interferometrie. Ich výhodou je použiteľnosť aj tam, kde meraný povrch nie je fyzicky dostupný, vysoká presnosť, relatívna veľká rýchlosť a to, že nepoškodzujú meraný povrch.

Interferencia svetelných vln je špeciálny typ superpozície dvoch alebo viacerých postupných vln. Jej výsledkom je konštruktívne alebo deštruktívne skladanie intenzít svetelných vln s časovo stálymi maximami a minimami [4, 5]. Má nespočetne rôznych použití, najmä pri veľmi presnom meraní dĺžok porovnávaním optických dráh, ktoré svetlo musí prejsť. Preto je vhodná na mapovanie nerovného povrchu, kde svetlo od optickej zostavy musí uraziť rozličnú dráhu po bod predmetu v jeho určitej výške. Porovnávaním tejto zmeny optickej dráhy s referenčne danou pevnou vzdialenosťou je možné zistiť informáciu o výške predmetu v mnohých bodoch. Porovnávanie optickej dráhy dvoch vln môže byť buď keď každá z nich prejde raz nejakým prostredím, alebo dvakrát, kde každá vlna sa na konci odrazí od zrkadla alebo pozorovaného predmetu a musí prejsť rovnakým prostredím znova v opačnom smere. My sa pri mapovaní povrchu predmetu zameriame na zmenu optickej dráhy len na odraz a preto popíšeme interferometre použiteľné pre túto úlohu.

1.1. Typy interferometrov

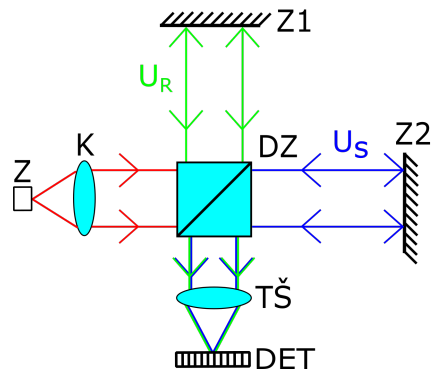
Najznámejší interferometer je **Michelsonov** (Obrázok 1.1a), ktorý pracuje na princípe delenia amplitúdy vlny. Vynašiel ho Albert Abraham Michelson v roku 1881. Svetlo zo zdroja (Z) dopadá na delič zväzku (DZ) a rozdelí sa do dvoch vetiev, kde jedna zostáva ako referenčná (U_R) a druhá je použitá ako signálna (U_S). Obidve tieto vetvy sú zakončené rovinnými zrkadlami (Z1 a Z2), kde sa svetlo odrazí a ide späť k DZ. Následne spolu vlny U_S a U_R interferujú na tienitku alebo detektore (DET). Pri použití polopriepustného zrkadla (PZ, ktorého čelná strana je čiastočne odrazná a zadná strana má antireflexnú vrstvu) ako DZ prejde U_S sklenenou doštičkou trikrát a U_R len raz. Preto sa niekedy, najmä pri použití bieleho svetla ako zdroja, do jednej z vetiev začleňuje kompenzačné sklíčko (KS) o rovnakej hrúbke a z rovnakého materiálu ako je PZ aby bola rovnaká optická dráha pre všetky vlnové dĺžky v obidvoch ramenách (Obrázok 1.1b) [4, 6]. Ak je použité KS, je vhodné aby malo na obidvoch stranách antireflexné vrstvy pre minimalizáciu parazitných odrazov a nežiadúcich interferencií.



Obrázok 1.1: Základná konfigurácia Michelsonovho interferometra (a) a konfigurácia s využitím polopriepustného zrkadla ako deliča zväzku s kompenzačným sklíčkom pre rovnakú optickú dráhu (b).

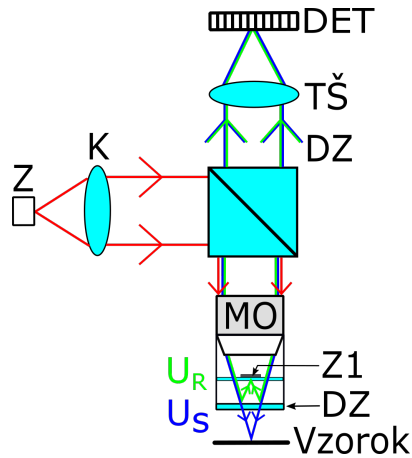
Tento interferometer má mnoho využití. Napríklad veľmi presné meranie dĺžok [4, 5], detekciu gravitačných vln [2, 6] alebo Fourierovskú spektroskopiu [7].

Variáciou Michelsonovho interferometra je **Twyman-Greenov interferometer** (Obrázok 1.2), využívaný prevažne na testovanie optických komponentov [2]. Vynašili ho a patentovali Frank Twyman a Arthur Green v roku 1916. Rozdiel oproti Michelsonovmu interferometru je v tom, že tu sa používa monochromatický bodový zdroj svetla (Z) s kolimátorom (K), takže sa pracuje so širokým zväzkom svetla. Na výstupe je kolimované svetlo zobrazené na tienitko alebo detektor (DET) tubusovou šošovkou (TŠ) [5].



Obrázok 1.2: Základná konfigurácia Twyman-Green interferometra.

Mirau interferometer taktiež pracuje na princípe Michelsonovho interferometra [6, 8]. Vynašiel ho André Henri Mirau, ktorý si ho dal patentovať v roku 1949. Hlavným rozdielom oproti Michelsonovmu interferometru je fyzická poloha referenčného ramena, ktoré je v tomto interferometri v ose mikroskopového objektívu (MO) (Obrázok 1.3). Skladá sa z dvoch sklíčok pred mikroskopovým objektívom, z ktorých jedno funguje ako delič zväzku (DZ) a na druhom je umiestnené malé zrkadlo (Z1), ktoré slúži ako referenčná plocha.



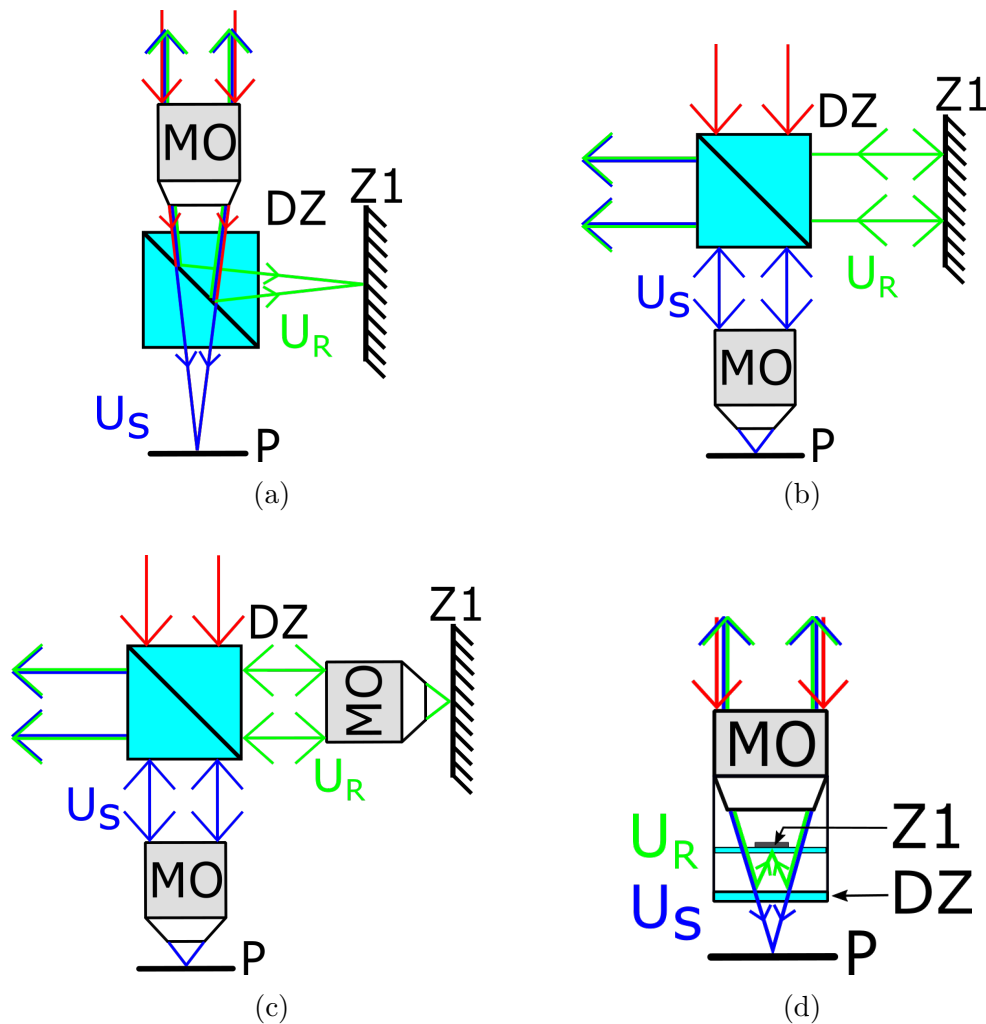
Obrázok 1.3: Jednoduchá zostava s Mirau interferometerom.

1.1.1. Použitie interferometrov pre mapovanie mikroskopického povrchu

Interferometre spomenuté v kapitole 1.1 je možné použiť na mapovanie povrchu o veľmi malých rozmeroch. K tomu je potrebné do použitej zostavy začleniť minimálne jeden mikroskopový objektív (MO), ktorého parametre musia byť vhodné pre daný typ interferometra. Zaznamenaná interferenčná štruktúra je potom numericky analyzovaná aby sa získala informácia o výške pozorovaného predmetu [2]. V závislosti na požadovanom zväčšení zostavy a numerickej apertúre sa použije jedna z nasledujúcich konfigurácií;

Prvá konfigurácia s Michelsonovým interferometrom (Obrázok 1.4a) má deliacu zväzku umiestnenú až za objektívom, z čoho plynie hlavná výhoda - použitie len jedného objektívu a podobná optická dráha pre signálnu a referenčnú vetvu. Používa mikroskopový objektív s veľmi dlhou pracovnou vzdialenosťou, čo je ťažko realizovateľné pre väčšie zväčšenia. Preto sa používa len s objektívmi s malými zväčšeniami ($m \approx 2,5 - 5$) a malými numerickejšími apertúrami.

V konfigurácii Twyman-Green (Obrázok 1.4b) je mikroskopový objektív v signálnej vetve, ktorý osvetľuje predmet a zároveň zobrazuje jeho obraz. Sú v nej ale rozdielne optické dráhy vo vetvách, čo môže mať negatívny vplyv na výslednú koherenciu a všeobecne kvalitu merania.



Obrázok 1.4: Rôzne konfigurácie interferometrov pre mapovanie mikroskopického povrchu: Michelsonova konfigurácia (a), Twyman-Green (b), Linnik (c), Mirau (d).

V konfigurácii Linnik (Obrázok 1.4c) sú použité dva mikroskopové objektívy, takže je dosiahnutá rovnaká optická dráha v oboch vetvách. Hlavná výhoda je možnosť použitia objektívov s veľkým zväčšením ($m \approx 50 - 100$), ktoré majú krátku pracovnú vzdialenosť. Keďže sú potrebné dva čo najpodobnejšie mikroskopové objektívy, môže to byť zbytočne drahá zostava náročná na výrobu, pretože každá optická sústava má aberácie a určité disperzné vlastnosti, ktoré by použité objektívy mali mať čo najpodobnejšie. Pri použití objektívov s krátkou pracovnou vzdialenosťou je tiež zložitá ich správne najustovať a preto sa komerčne

moc nepoužívajú [2, 9].

Mirau interferometer (Obrázok 1.4d) je výhodné použiť pre objektívy so stredným zväčšením ($m \approx 10 - 20$), kde pre jeho kratšiu pracovnú vzdialenosť nie je dostatok miesta na umiestnenie kockového deliča zväzku pre vytvorenie Michelsonovej konfigurácie. Nie je vhodný pre objektívy so zväčšením menším ako 10x, pretože referenčné zrkadlo zatemňuje moc veľkú časť apertúry. Referenčné zrkadlo musí byť väčšie ako zorné pole pretože je to združená rovina k povrchu pozorovaného predmetu. Pre veľké zväčšenia objektívu - viac ako 50x je pracovná vzdialenosť objektívu moc krátka a nie je možné medzi objektív a predmet umiestniť delič zväzku a referenčné zrkadlo [2, 9].

1.2. Záznam a jeho spracovanie

V tejto sekcii bude matematicky popísaná interferencia vln v interferometri a rekonštrukcia fázového rozdielu medzi signálnou a referenčnou vlnou. Predpokladajme interferenciu dvoch rovinných monochromatických vln - signálnej U_S a referenčnej U_R , ktoré môžeme zapísať vo všeobecnom tvare ako

$$\begin{aligned} U_S &= A_S \cdot e^{-i\varphi_S} , \\ U_R &= A_R \cdot e^{-i\varphi_R} . \end{aligned} \tag{1.1}$$

A_S a A_R sú ich amplitúdy a φ_S, φ_R sú ich fázy. Ich výslednú amplitúdu zapíšeme

$$U = U_S + U_R = A_S \cdot e^{-i\varphi_S} + A_R \cdot e^{-i\varphi_R} . \tag{1.2}$$

Výsledné interferenčné pole bude

$$I = |U|^2 = |U_S + U_R|^2 = U_S \cdot U_S^* + U_R \cdot U_R^* + U_R \cdot U_S^* + U_S \cdot U_R^* , \tag{1.3}$$

kde * značí komplexné združenie. Po úprave dostaneme

$$I = A_S^2 + A_R^2 + A_S \cdot A_R \cdot e^{i(\varphi_S - \varphi_R)} + A_S \cdot A_R \cdot e^{-i(\varphi_S - \varphi_R)} , \tag{1.4}$$

kde nahradíme $\Delta\varphi = \varphi_S - \varphi_R$, takže $\Delta\varphi$ značí fázový rozdiel medzi vlnami. Ďalej upravíme s použitím Eulerových vzorcov a amplitúdy vln A_S^2 a A_R^2 prepíšeme na

intenzity I_S a I_R podľa úmernosti $I = A^2$

$$I = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S \cdot I_R} \cdot \cos(\Delta\varphi). \quad (1.5)$$

Výsledkom je interferenčný zákon [4, 5]. Tento vzťah platí pre plne koherentné svetlo.

1.2.1. Použitie interferometrie s fázovým posunom

Analýzou interferenčných prúžkov z jedného interferogramu je možné získať informáciu o tvare povrchu predmetu. V rámci jedného prúžku je výška predmetu rovnaká a príslušný prúžok značí zmenu výšky o $\lambda/2$. Problém je však subjektívne určenie stredu prúžku so zlou opakovateľnosťou merania a taktiež nie je možné určiť či povrch predmetu stúpa alebo klesá.

Tieto problémy rieši **interferometria s fázovým posunom**, ktorá nezávisí na určení stredu interferenčných prúžkov a informáciu o povrchu predmetu získame pre každý bod záznamu. Podstatou interferometrie s fázovým posuvom je zaznamenanie viac interferogramov, kde sa medzi jednotlivými záznamami musí meniť fázový posuv medzi signálnou a referenčnou vlnou, ktorý budeme ďalej značiť δ [2]. Zjednodušíme interferenčný zákon 1.5 na

$$I = A + B \cdot \cos(\Delta\varphi + \delta), \quad (1.6)$$

kde $A = I_S + I_R$ je základná intenzita v interferograme a $B = 2\sqrt{I_S \cdot I_R}$ je modulačná intenzita interferogramu premenná s kosínovou závislosťou fázového rozdielu $\Delta\varphi$ referenčnej a signálnej vlny. Dostávame rovnicu o troch neznámych ($A, B, \Delta\varphi$). Aby sme získali hodnotu $\Delta\varphi$, potrebujeme minimálne tri interferenčné záznamy, kde budeme meniť δ , ktoré poznáme. 3-krokový algoritmus je najjednoduchší na použitie, ale citlivý na rôzne druhy chýb [10]. Pre dosiahnutie vyššej presnosti merania a odolnosti proti chybám je lepšie použiť 4-krokový alebo 5-krokový algoritmus s krokom fázového posuvu $\delta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, prípadne ešte 2π . Dostaneme štyri interferogramy, ktorých intenzity budú

$$\begin{aligned}
I_1 &= A + B \cdot \cos(\Delta\varphi), \\
I_2 &= A + B \cdot \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right), \\
I_3 &= A + B \cdot \cos(\Delta\varphi + \pi), \\
I_4 &= A + B \cdot \cos\left(\Delta\varphi + \frac{3\pi}{2}\right), \\
I_5 &= A + B \cdot \cos(\Delta\varphi + 2\pi).
\end{aligned} \tag{1.7}$$

Po úpravách dostaneme

$$\begin{aligned}
I_1 &= A + B \cdot \cos(\Delta\varphi), \\
I_2 &= A - B \cdot \sin(\Delta\varphi), \\
I_3 &= A - B \cdot \cos(\Delta\varphi), \\
I_4 &= A + B \cdot \sin(\Delta\varphi), \\
I_5 &= A + B \cdot \cos(\Delta\varphi).
\end{aligned} \tag{1.8}$$

Z interferogramov 1.8 dokážeme vypočítať fázový rozdiel $\Delta\varphi$ zo štyroch alebo piatich záznamov podľa

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right\} \tag{1.9}$$

alebo

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{2 \cdot (I_2 - I_4)}{2 \cdot I_3 - I_5 - I_1} \right\}. \tag{1.10}$$

Kontrast interferenčných prúžkov v zázname bude daný vzťahom

$$K = \frac{B}{A}. \tag{1.11}$$

Je vidieť, že kvalita rekonštrukcie $\Delta\varphi$ teoreticky nezávisí na kontraste v danom bode, ak sa kontrast počas záznamu interferogramov nemení. Inak povedané, ak sa hodnoty koeficientov A a B nemenia počas záznamu interferogramov $I_1 - I_5$, tak nezáleží akú majú hodnotu. Prakticky to ale bude mať vplyv, pretože sa mení pomer signál-šum.

V odbornej literatúre je popísaných mnoho ďalších vzťahov pre výpočet $\Delta\varphi$, ktoré používajú od 3 do 11, prípadne ešte viac fázových posuvov δ . Pre každý z daných vzťahov je možné optimalizáciou nájsť najvhodnejší krok δ [11, 12]. Používajú sa pre korekciu rôznych chýb merania ako napríklad nelinearity posuvu fázy, odolnosť voči vibráciám zostavy alebo turbulenciám vzduchu a nelinearitám vlastností detektorov [2]. Vzťah 1.10 má dobré potlačenie týchto vplyvov a funguje najlepšie pre $\Delta\delta = \pi/2$ [2, 13].

1.2.2. Praktická realizácia fázového posunu medzi vlnami

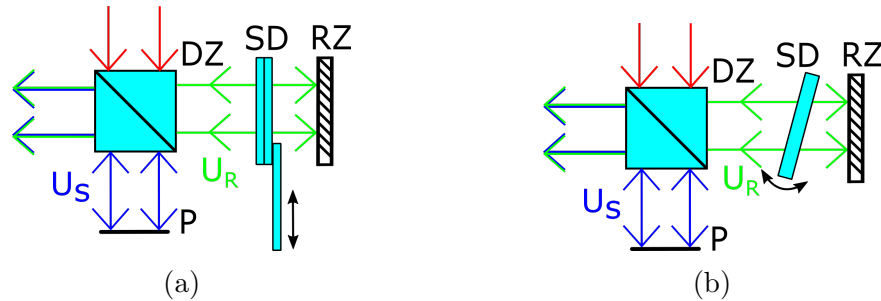
Existuje niekoľko spôsobov ako vytvoriť fázový posun medzi signálnou a referenčnou vlnou a následne získať ich fázový rozdiel [2]. Rozdelíme ich podľa toho, či vyžadujú počas merania mechanický zásah do zostavy alebo nie. Celková presnosť rekonštrukcie povrchu pozorovaného predmetu je závislá na presnosti fázového posuvu medzi interferujúcimi vlnami a algoritme numerického spracovania. Taktiež závisí na vzorkovaní a kvantovaní kamery, fluktuáciách intenzity zdroja a vibráciách zostavy.

1. Metódy s mechanicky pohyblivými komponentami

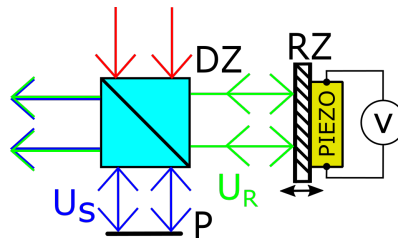
Jednou z možností zavedenia fázového posuvu medzi interferujúcimi vlnami je zmena optickej dráhy v jednej z vetiev. Pri použití Twyman-Greenovho interferometra je najjednoduchšou realizáciou vkladanie sklenených doštičiek (SD) do referenčnej vetvy (Obrázok 1.5a). Po dvojitom prechode svetla SD sa zavedie fázové oneskorenie $m \cdot \lambda + \lambda/4$, kde m je celé číslo. V tejto zostave je dôležité pri použití svetelného zdroja so širším spektrom dbať na dodržanie jeho koherenčnej dĺžky. Podobnou variáciou je použitie jednej SD, ktorá pri naklonení mení optickú dráhu vo vetve (Obrázok 1.5b).

Častejšie používané metódy využívajú posuv zrkadla pomocou piezoelektrických komponentov. Sú to niektoré druhy kryštálov alebo keramiky, ktoré po privedení elektrického napätia menia svoju dĺžku. Po naprogramovaní a automatizácii merania teda nie je nutný počas merania mechanický zásah človeka do zostavy, ale stále sú použité pohyblivé časti. V Twyman-Greenovom interferometri sa veľmi

presným posuvom referenčného zrkadla (RZ) mení optická dráha referenčnej vetvy a teda jej fáza na výstupe (Obrázok 1.6).



Obrázok 1.5: Zostavy Twyman-Green interferometra pre zavedenie fázového oneskorenia; s vkladáním sklenených doštičiek (a) alebo naklápaním jednej (b).



Obrázok 1.6: Twyman-Green interferometer s piezo posuvom referenčného zrkadla.

Pri posuve zrkadla o vzdialenosť d sa optická dráha vo vetve zmení o $2d$. Keď sa bude zrkadlo posúvať po krokoch $\lambda/4$, získame štyri interferogramy pre rekonštrukciu $\Delta\varphi$ pomocou vzorca 1.9. Túto techniku je taktiež možné použiť s Mirau alebo Michelson interferometrom, kde piezoposuv pohybuje buď pozorovaným predmetom alebo celým mikroskopovým objektívom s interferometrom. Celkový posuv je rádovo $\approx 1\lambda$, takže pozorovaný predmet zostane vrámci hĺbky ostrosti objektívu. Komponenty s piezoposuvmi sú komerčne dostupné a dosahujú presnosť posuvu v jednotkách nanometrov.

Existujú ešte ďalšie metódy, ako napríklad použitie akustooptického modulátoru alebo referenčná vlna v optickom vlákne navinutom na piezokryštáli.

2. Metódy bez mechanicky pohyblivých komponentov

S využitím sofistikovanejších optických prvkov je možné robiť interferometriu s fázovým posunom bez mechanického zásahu do zostavy počas merania. V tomto prípade je možné plne automatizovať meranie a zároveň minimalizovať vibrácie a zlepšiť jeho kvalitu. Tieto optické zostavy používajú polarizačné prvky a referenčná a signálna vlna majú inú polarizáciu. Z toho plynie ďalšia výhoda - ladenie kontrastu interferenčných prúžkov v interferograme pomocou lineárneho polarizátora na výstupe zo zostavy a teda možnosť pozorovať veľmi málo odrazné predmety.

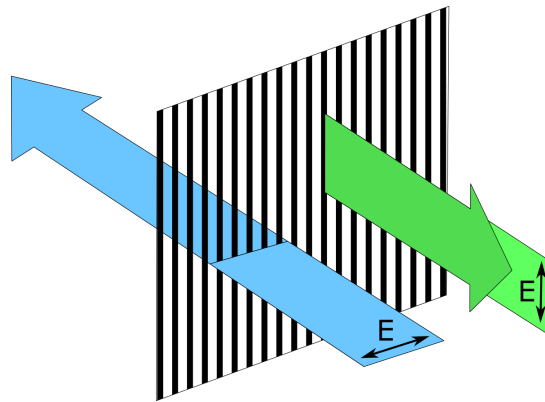
Jednou z možností realizácie bez mechanického zásahu do zostavy je použitie anizotropného prostredia - variabilného retardéru z tekutých kryštálov. V tejto konfigurácii sú referenčná a signálna vlna navzájom kolmo lineárne polarizované a tekutý kryštál zavedie v závislosti na privedenom napätí fázové oneskorenie do jednej zložky polarizácie. Touto metódou sa budeme ďalej zaoberať a vyskúšame ju v experimentálnej časti. Variáciou tejto zostavy je použitie dvoch alebo štyroch kamier na záznam interferogramu. Rozdielom je, že vystupujúce svetlo z interferometra sa rozdelí deličom/deličmi zväzku na dva/štyri zväzky pri zachovaní optickej dráhy signálnej vetvy, zatiaľčo optická dráha referenčnej vetvy sa predlžuje pomocou fázových doštičiek o $\lambda/4$ pre každú kameru. Pri použití dvoch kamier teda stačia 2×2 záznamy kde medzi prvou a druhou sériou dvoch snímok je navyše fázový posun $\lambda/2$ a pri použití štyroch kamier sa nasnímajú 1×4 záznamy naraz, takže nieje potrebná dodatočná zmena fázy. Nevýhodou použitia viac kamier je obtiažnejšia justáž a možný nedostatok svetla v obrazovej rovine.

Ďalšia možnosť je použiť kameru s polarizačným filtrom, kde 4 pixely tvoria jeden superpixel a každý zo 4 pixelov má vlastný polarizátor pootočený o 45° . Táto štruktúra polarizátorov sa opakuje na celom snímači a je umiestnená medzi poľom mikrošošoviek a fotodiód. Výhoda tejto metódy je v tom, že stačí jeden simultánny záznam, z ktorého sa dá vypočítať tvar povrchu pozorovaného predmetu. Obmedzujúca však môže byť nedokonalosť štruktúry polarizátorov, kde môžu vzniknúť parazitné interferencie medzi polarizátormi, senzorom a poľom

mikrošošoviek. Je to ale možné kalibrovať a táto metóda už bola experimentálne overená s dosiahnutím kvalitných výsledkov [14].

1.3. Využitie wire grid polarizátoru ako deliča zväzku

Wire grid (WG, po anglicky; wire grid = drôtená mriežka) polarizátor pozostáva z tenkého podkladového sklíčka s hrúbkou približne jeden mm, na ktorom sú naparené rovnobežné tenké kovové drôtičky o hrúbke rádovo v desatinách nm [15]. Tie môžu byť prekryté ďalším tenkým krycím sklíčkom. Pri dopade nepolarizovaného svetla je prepustená zložka rovnobežná s osou polarizácie (P), ktorá je kolmá na kovové drôtičky. Zložka kolmá na osu polarizácie (S) rovnobežná s drôtičkami je prevažne odrazená a čiastočne pohltená (Obrázok 1.7).



Obrázok 1.7: Schéma wire grid polarizátoru; modrá - prepustená P zložka polarizácie, zelená - odrazená S zložka polarizácie.

Teoretická odrazivosť a priepustnosť wire grid polarizátoru

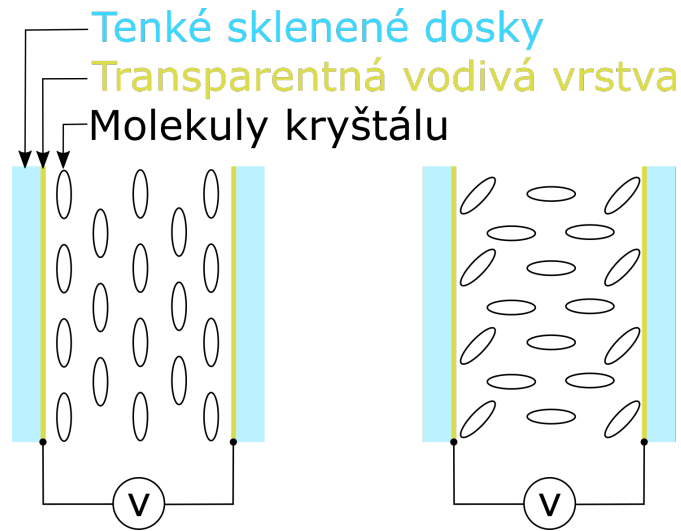
Ideálny polarizátor prepúšťa len P zložku polarizácie a S zložku pohltí alebo odrazí. Avšak reálny polarizátor čiastočne pohlcuje a odráža P zložku a rovnako čiastočne pohlcuje a prepúšťa S zložku. Podľa prepustnosti a odrazivosti polarizácií od výrobcu Thorlabs [15]

$$\begin{aligned}
T_P &= 91,2\% , \\
T_S &= 0,08\% , \\
R_P &\approx 10\% , \\
R_S &\approx 80\% ,
\end{aligned}
\tag{1.12}$$

ktoré platia pre He-Ne laser, takýto polarizátor môže byť použiteľný na polarizačné rozdelenie zväzku.

1.4. Variabilný retardér z tekutých kryštálov

Ďalej sa v práci zameriame na použitie Mirau interferometra s wire grid polarizátorom ako deličom zväzku. Signálna a referenčná vlna majú navzájom kolmú lineárnu polarizáciu. Fázové oneskorenie medzi tieto dve vlny je možné zaviesť použitím anizotropného optického prostredia. Je výhodné použiť variabilný retardér, ktorý je zložený z tekutého kryštálu umiestneného medzi dvomi tenkými sklenenými doskami, na ktorých je z vnútornej strany umiestnená transparentná vodivá vrstva (Obrázok 1.8).



Obrázok 1.8: Schéma variabilného retardéru z tekutých kryštálov; vľavo bez privedeného napätia - molekuly sú usporiadané orientované a vďaka ich tvaru sa vytvára optická anizotropia; vpravo po privedení napätia - molekuly sa orientujú v smere elektrického poľa a pomocou privedeného napätia a teda náklonu molekúl sa mení optická anizotropia látky.

Po privedení napätia medzi vodivé vrstvy sa molekuly tekutého kryštálu zorientujú a menia sa vlastnosti jeho optickej anizotropie. Napätie privádzané na tekutý kryštál musí byť striedavé, aby nedošlo k jeho trvalému poškodeniu kvôli nahromadeniu náboja. To sa môže prejaviť negatívne, pretože rozdiel medzi riadnym a mimoriadnym indexom lomu je závislý na napätí privedenom medzi elektródy a teplote kryštálu. Typicky tieto tekuté kryštály pracujú so striedavým napätím o frekvencii 2 kHz, takže sa bude vnútorne zahrievať a jeho optické vlastnosti sa budú nekontrolovane meniť. Taktiež sa jeho vlastnosti menia s tým ako starne [16].

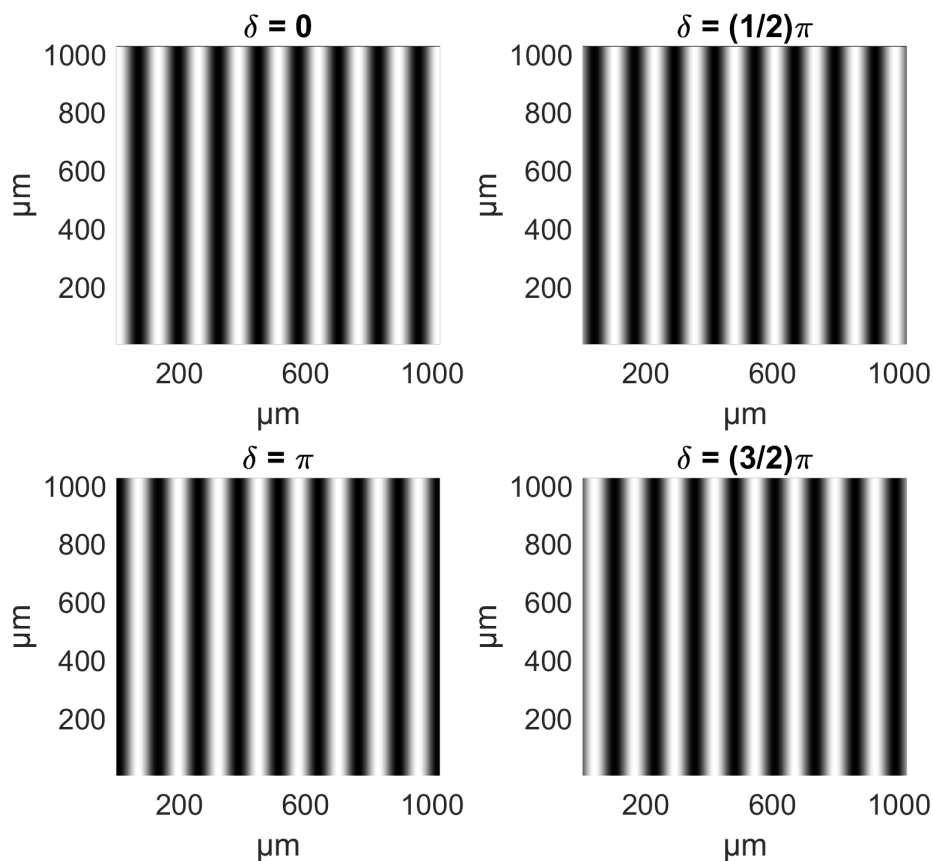
1.5. Simulácia interferencie vln a rekonštrukcia fázového rozdielu

V tejto časti budú diskutované simulácie interferencie dvoch vln v programe MATLAB. Jedna navyše bude fázovo posúvaná po krokoch $\delta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$. Výsledné interferenčné obrazce si budeme ukladať a následne vyskúšame rekonštrukciu fázového rozdielu medzi interferujúcimi vlnami podľa vzorca 1.9, jeho nadviazanie pomocou funkcie `unwrap` (po anglicky; `unwrap` = rozbaľiť) pre naviazanie fázových skokov a zobrazenie tvaru povrchu simulovaného predmetu.

Uvažujme interferenciu dvoch monochromatických koherentných rovinných vln, kde referenčná sa bude šíriť priamo na ose x a signálna bude odklonená o uhol θ od osi x . Ich zápis bude

$$U_R = A_R \cdot e^{i\delta}, \quad U_S = A_S \cdot e^{i \cdot k \cdot x \cdot \sin\theta}. \quad (1.13)$$

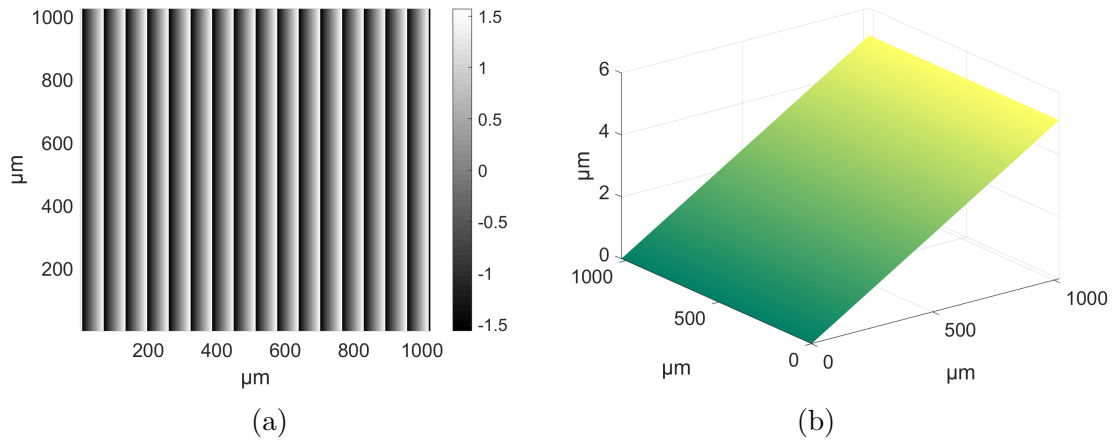
kde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ je vlnové číslo a λ vlnová dĺžka svetla. Jedná sa teda o simuláciu naklonenej rovinnej plochy o uhol $\theta = 0,005$ rad, pri použití $\lambda = 633$ nm. Perióda intenzity v interferenčnom obrazci (Obrázok 1.9) závisí na uhle θ odklonenej vlny, teda náklone pozorovaného predmetu a posúva sa do strany so zmenou δ .



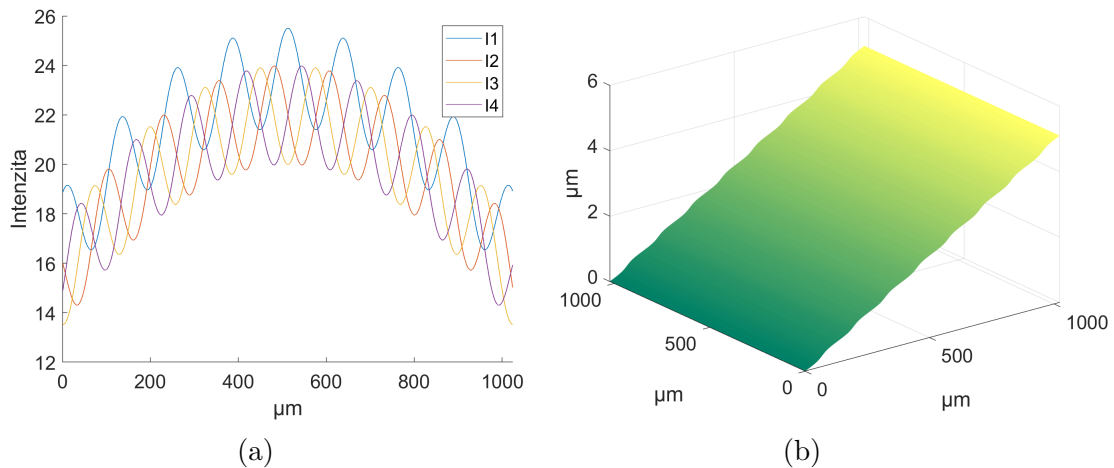
Obrázok 1.9: Interferenčné obrazce vzniknuté interferenciou dvoch rovinných monochromatických vln vzájomne odklonených o $\theta = 0,005$ rad. Jedna vlna je navyše fázovo posúvaná s krokom δ .

Po vypočítaní fázového rozdielu $\Delta\varphi$ (Obrázok 1.10a) urobíme jeho naviazanie pomocou funkcie `unwrap` a zobrazíme výsledný obraz v trojosom súradnicovom systéme (Obrázok 1.10b).

Chyby v rekonštrukcii fázového rozdielu môžu nastať, ak fázový posuv medzi vlnami nie je rovný $\frac{\pi}{2}$, alebo fluktuuje intenzita v interferogramoch - napríklad kvôli fluktuácii intenzity zdroja alebo zmene expozičnej doby kamery počas záznamu interferogramov. V takom prípade sa pri interferencii dvoch rovinných vln prejaví po naviazaní $\Delta\varphi$ zvlnenie výsledného obrazu (Obrázok 1.11). Kvalita rekonštrukcie však v ideálnom prípade bez šumu nezávisí na intenzite a kontraste prúžkov, ak sa v danom bode počas záznamu interferogramov nemení.



Obrázok 1.10: Fázový rozdiel $\Delta\varphi$ medzi signálnou a referenčnou vlnou (a) a naviazaný $\Delta\varphi$ pomocou funkcie `unwrap` (b).



Obrázok 1.11: Intenzita v interferogramoch s fázovým posunutím a intenzívnejším prisvetlením strede ako na okrajoch, kde I_1 je navyše prisvetlený o hodnotu 1,5 (a). Rekonštruovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ medzi signálnou a referenčnou vlnou z daných interferogramov (b). Zvlnenie výsledného obrazu je spôsobené len intenzívnejším prisvetlením I_1 .

Kapitola 2

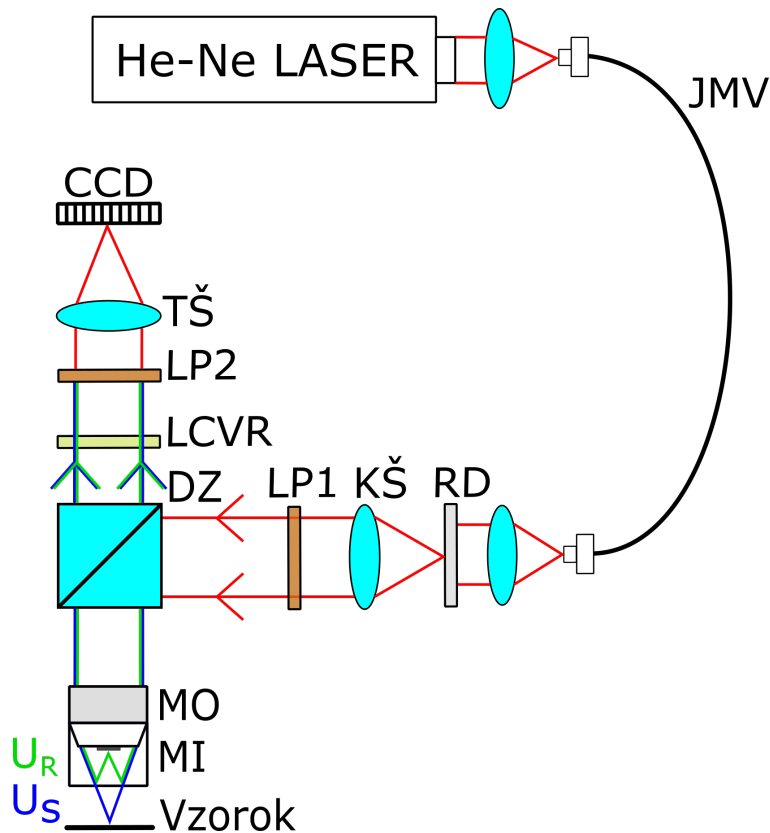
Experimentálna časť

V tejto kapitole bude popísaný priebeh meraní v laboratóriu, použitá experimentálna zostava a jej justáž a kalibrácia. Ďalej prebieh numerickej rekonštrukcie, spracovanie záznamov a nakoniec budú prezentované výsledky meraní.

2.1. Použitá experimentálna zostava

V našej experimentálnej zostave (Obrázok 2.1) bol použitý ako zdroj svetla polarizovaný He-Ne laser ($\lambda=632,8$ nm), naviazaný do jednomódového optického vlákna (JMV). Po výstupe z vlákna bolo svetlo kolimované a týmto kolimovaným zväzkom sa osvetľoval rotačný difuzér (RD), použitý na zníženie priestorovej koherencie svetla a potlačenie parazitných interferencií v obraze. Povrch difuzéru bol ďalej zobrazovaný kolimačnou šošovkou (KŠ, $f'=50$ mm) ako kolimovaný zväzok, ktorý prechádzal cez lineárny polarizátor (LP1) a delič zväzku (DZ) do mikroskopového objektívu (MO). Použitý bol Nikon CF Plan 10x/0.30 DI, navrhnutý priamo pre použitie s Mirau interferometrom. V našej zostave bol dodávaný Mirau na MO nahradený wire grid polarizátorom použitým ako delič zväzku a sklíčkom s referenčným zrkadlom. Tam sa svetlo rozdelilo na signálnu (U_S) a referenčnú (U_R) vlnu, ktoré sú navzájom ortogonálne lineárne polarizované. Po odraze U_R od referenčného zrkadla a U_S od pozorovaného povrchu prešli obidve vlny znova cez DZ a variabilný retardér z tekutého kryštálu (LCVR, z angličtiny; liquid crystal variable retarder), ktorý medzi ne zaviedol nastaviteľný fázový po-

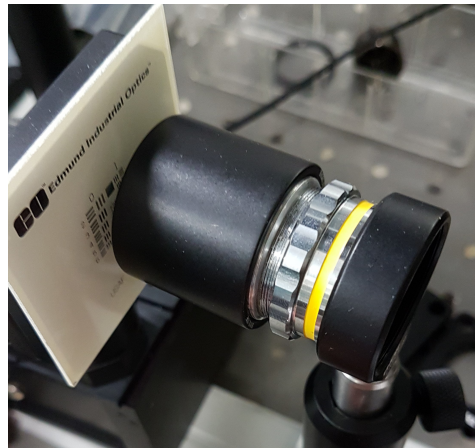
suv. Bol použitý model LCC1223-A od firmy Thorlabs. Keďže polarizácie U_S a U_R sú na seba kolmé, musia tieto vlny prejsť lineárnym polarizátorom (LP2) pootočeným o uhol 45° , aby boli ich vektory elektrickej intenzity v jednej rovine a mohli spolu interferovať. Na konci zostavy tubusová šošovka (TŠ, $f'=100$ mm) priamo zobrazila obraz predmetu na CCD čip kamery, ktorý bol umiestnený v jej ohniskovej rovine. Použitá bola farebná kamera Thorlabs DCC1645C s rozlíšením 1280×1024 pixelov a veľkosťou pixelu $5,165 \times 5,165 \mu\text{m}$. Obraz RD je zobrazovaný priamo do roviny pozorovaného predmetu a následne na kameru, takže pracujeme s kritickým osvetlením.



Obrázok 2.1: Schematický náčrt použitej zostavy s Wire grid Mirau interferometrom.

Justáž optických členov

V našej zostave nebol použitý komerčne vyrobený Mirau interferometer, ale wire grid polarizátor v hliníkovom držiaku s ďalším sklíčkom, na ktorom bolo referenčné zrkadielko. Celé to bolo našróbované na mikroskopovom objektíve namiesto pôvodného Mirau interferometra s nepolarizačným deličom zväzku (Obrázok 2.2). Preto bolo potrebné najustovať interferometer tak, aby referenčné zrkadlo bolo v predmetovej ohniskovej rovine mikroskopového objektívu. Justovaním a otáčaním sa ale otáčal aj DZ a teda sa menil náklon polarizácie U_R a U_S . Z toho vyplýva potreba LP1 v zostave - z vlákna vystupuje všeobecne polarizované svetlo, ktoré nemusí mať rovnakú intenzitu v smere U_R a U_S . Rozloženie smeru intenzity závisí na danom umiestnení vlákna, pri jeho presunutí sa môžu intenzity meniť - degradovať až na takmer lineárne polarizované svetlo. Aby teda bolo zaistené, že sa svetlo dostane do oboch vln v interferometri, musí byť LP1 správne orientovaný.



Obrázok 2.2: Mirau interferometer na mikroskopovom objektíve. Naľavo pozorovaný predmet - odrazný USAF 1951 test.

Po zaostrení MO na referenčné zrkadlo a pozorovaný predmet je potrebné zistiť uhol natočenia DZ v interferometri a teda U_R a U_S . Podľa toho sa musí správne natočiť aj LCVR, aby jeho nastaviteľná osa bola rovnobežná s polarizáciou jednej z vln. To je možné jednoducho pomocou výstupného LP2 v zostave, ktorým sa na konci justáže pred meraním ladí kontrast výsledného interferenčného obrazca.

Meranie zväčšenia zostavy

Zväčšenie zostavy závisí na zväčšení použitého objektívu, tubusovej šošovky a polohy predmetu a obrazu voči ich ohniskám. Použitý objektív má zväčšenie $m_{\text{OBJ}} = 10$ pri použití s tubusovou šošovkou s $f'_D = 200$ mm (dolný index D - dizajnovaná). V našej zostave bola použitá šošovka s $f'_P = 100$ mm (dolný index P - použitá). Výsledné priečne zväčšenie zostavy vypočítame podľa vzťahu

$$m = m_{\text{OBJ}} \cdot \frac{f'_P}{f'_D} = 10 \cdot \frac{100}{200} = 5 . \quad (2.1)$$

V praxi je možné, že nebudeme zobrazovať obraz pozorovaného predmetu presne z ohniska MO do ohniska TŠ a preto je dobré si presné priečne zväčšenie zmerať. Na to sme použili čiarový test USAF 1951 o známej veľkosti a výpočtom z veľkosti obrazu - počet pixelov na kamere, ktoré zaberá čiara testu krát veľkosť pixelu kamery, sme získali výsledné zväčšenie

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{208 \text{ pixelov} \cdot 5,165 \mu\text{m}}{176,78 \mu\text{m}} = 6,08 , \quad (2.2)$$

kde y' je veľkosť obrazu a y veľkosť predmetu.

Meranie odrazivosti a priepustnosti wire grid polarizátoru

Wire grid polarizátor použitý v experimentálnej zostave má označenie WP25M-VIS a je od firmy Thorlabs. Zmerali sme jeho odrazivosť (R, z angličtiny; reflectance) a prepustnosť (T, z angličtiny; transmittance) pre S a P zložky polarizácie pomocou výkonovo stabilizovaného He-Ne laseru. Namerali sme hodnoty

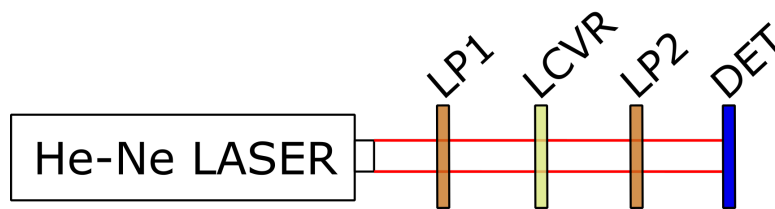
$$\begin{aligned} T_P &= 91,7\% , \\ T_S &= 0,03\% , \\ R_P &= 0,96\% , \\ R_S &= 81,45\% . \end{aligned} \quad (2.3)$$

T a R sme premerali pre rôzne uhly dopadu do 20° na polarizátor a namerané hodnoty sa líšili do 1 %. Nezabúdajme, že v použitom Mirau interferometri signálna aj referenčná vlna interaguje s polarizátorom dvakrát a preto sa vo výsledku

hodnoty ešte kvadraticky umocnia. Môžeme predpokladať, že použitý wire grid polarizátor bude fungovať ako polarizačný delič zväzku. Po justáži zostavy sme sa lokálne dostali k maximálnemu kontrastu interferenčných prúžkov $K = 0,5$, inak globálne ku $K \approx 0,37$.

2.2. Kalibrácia variabilného retardéru z tekutých kryštálov

Keďže sa vlastnosti optickej anizotropie použitého tekutého kryštálu menia s jeho vekom a teplotou, musí byť pred meraním nakalibrovaný. V kalibračnej zostave (Obrázok 2.3) bol ako zdroj svetla použitý výkonovo stabilizovaný He-Ne laser, z ktorého svetlo prešlo cez lineárny polarizátor (LP1) natočený o 0° , takže prepúšťal len vertikálne lineárne polarizované svetlo. Ďalej bol umiestnený variabilný retardér z tekutého kryštálu (LCVR) pootočený o 45° a nakoniec druhý lineárny polarizátor (LP2) natočený o 90° , ktorý prepúšťal len horizontálne polarizované svetlo. Ako detektor výkonu (DET) prešlého zostavou bol použitý merač výkonu PM100D od firmy Thorlabs so snímačom S121C.



Obrázok 2.3: Zostava použitá na kalibráciu variabilného retardéru z tekutých kryštálov.

Meranie závislosti fázového posunu δ zavedeného LCVR medzi riadnym a mimeriadnym paprskom na napätí U privedeného na elektródy kryštálu prebiehalo v relevantných medziach od 0,2 V do 6 V s krokom 0,005 V. Namerané hodnoty sa ukladali do tabuľky v počítači, kde boli spracované pomocou programu MATLAB. Po normalizácii nameraného výkonu sme vyniesli namerané hodnoty do grafu (Obrázok 2.4a). Keďže LCVR zavádza medzi zložku kolmú k jeho optic-

kej osi a rovnobežnú s jeho osou fázový posun δ , je možné intenzitu na výstupe vyjadriť pomocou výrazu

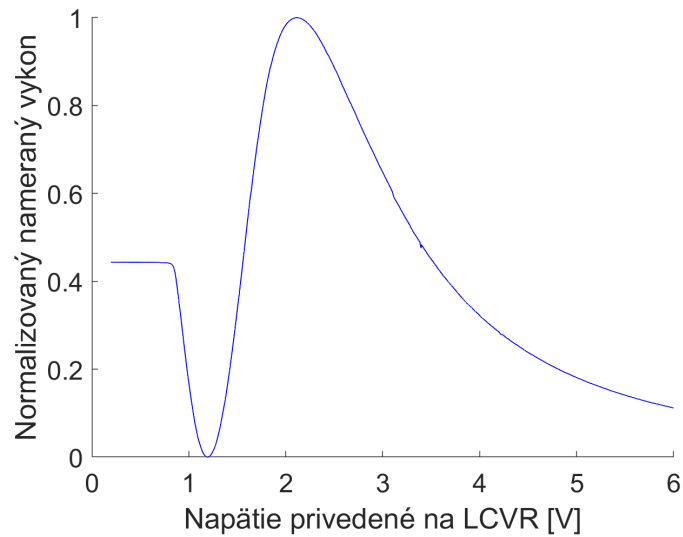
$$I = I_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) , \quad (2.4)$$

kde I je výstupná intenzita a I_0 je maximálna výstupná intenzita. Ďalej vzťah 2.4 upravíme na

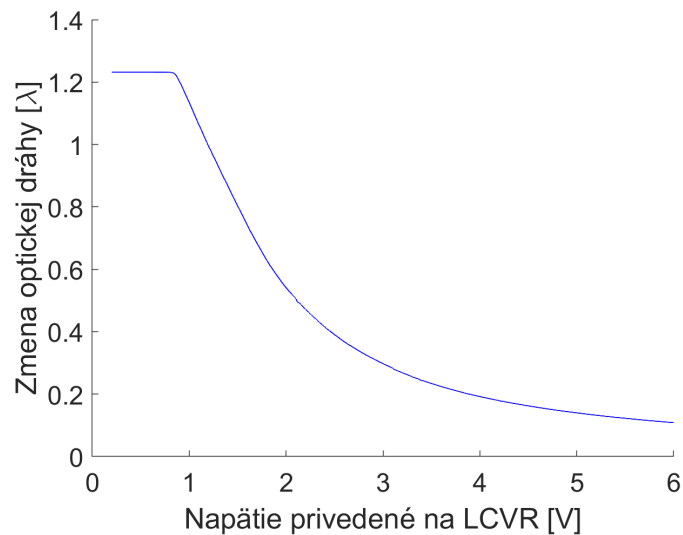
$$\delta = 2 \arcsin \left(\sqrt{I} \right) . \quad (2.5)$$

Po naviazaní nameraných hodnôt pomocou záchytných bodov minimálneho a maximálneho nameraného výkonu (v ktorých $\delta = \lambda$ a $\frac{\lambda}{2}$) dostávame graf závislosti zmeny optickej dráhy medzi riadnym a mimoriadnym paprskom na U (Obrázok 2.4b).

Použitý variabilný retardér z tekutého kryštálu je teplotne nestabilizovaný, takže nemáme úplne pod kontrolou zmenu optickej dráhy ktorú zavedie. Riešiť tento problém môžu teplotne stabilizované kryštály, ktoré sú komerčne dostupné.



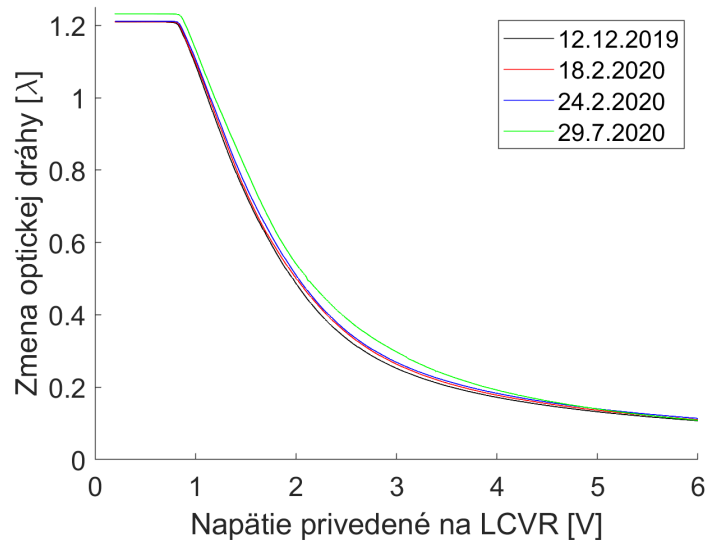
(a)



(b)

Obrázok 2.4: Graf závislosti nameraného výkonu (a) a fázového oneskorenia (b) na napätí privedenom na LCVR. Hodnoty sú platné pre He-Ne laser.

Následne sme z grafu nameraných hodnôt (Obrázok 2.4b) vybrali 5 fázových oneskorení s krokom $\lambda/4$ (podľa zvislej osi) a pre ne odpovedajúce napätia $U[k]$ (kde $k = \langle 1, 5 \rangle$) privádzané na tekutý kryštál, ktoré sa použijú počas merania. S odstupom času sa vlastnosti tekutého kryštálu nelineárne menili. Niektoré z kalibrácií sme vyniesli do grafu (Obrázok 2.5).



Obrázok 2.5: Grafy závislosti δ na U tekutého kryštálu podľa kalibrácií z rôznych dátumov.

2.3. Numerická rekonštrukcia obrazu povrchu

Proces numerickej rekonštrukcie obrazu povrchu pozorovaného predmetu prebieha na počítači pomocou programu MATLAB. Záznam interferogramov je automatizovaný - snímky z kamery sa ukladajú do štvorrozmernej matice $\mathbf{I}[\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{k}, \mathbf{j}]$, kde \mathbf{x} , \mathbf{y} sú priestorové súradnice (pixely kamery), \mathbf{k} je číslo záznamu s daným fázovým posunutím δ medzi signálnou a referenčnou vlnou, v našom prípade naberá hodnoty 4 pre vzorec 1.9 alebo 5 pre 1.10. Hodnota \mathbf{j} je počet opakovaní \mathbf{k} záznamov. Máme teda $\mathbf{j} \cdot \mathbf{k}$ záznamov, s ktorými ďalej pracujeme. Pri rekonštrukcii musíme manuálne kontrolovať, aby sme pracovali len v oblasti so širšími interferenčnými prúžkami, pretože veľmi úzke prúžky môžu prekročiť Shannon-Nyquistov vzorkovací teorém a nastane nežiadúci aliasing.

V prvom kroku spracovania záznamu sa priemerujú matice \mathbf{I} cez index \mathbf{j} aby sme sa zbavili obrazu rotačného difuzéru a dostaneme novú trojrozmernú maticu

$I[x, y, \mathbf{k}]$. Následne sa \mathbf{k} záznamov spracuje podľa vzorca 1.9

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{I[x, y, 1] - I[x, y, 3]}{I[x, y, 2] - I[x, y, 4]} \right\}, \quad (2.6)$$

alebo podľa vzorca 1.10

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \frac{2 \cdot (I[x, y, 2] - I[x, y, 4])}{2 \cdot I[x, y, 3] - I[x, y, 5] - I[x, y, 1]} \right\}. \quad (2.7)$$

Dostávame požadovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ medzi signálnou a referenčnou vlnou. Ďalej nasleduje naviazanie fázových skokov pomocou funkcie `unwrap`, ktorá najprv naviaže fázové skoky vodorovne v riadkoch a následne zvislo v stĺpcoch matice. Tento postup nemusí byť vždy ideálny, pretože ak bude v obraze nejaká chyba ako napríklad prach na predmete alebo kamere, nastane tam bude fázový skok a funkcia `unwrap` ho nesprávne nadviaže a vytvorí artefakt od danej nehomogenity až po okraj pozorovanej oblasti. Riešením tohto problému môže byť použitie špecializovaného algoritmu na naviazanie fázy - napríklad Goldstein algoritmus [17], ktorý bude tiež použitý a porovnáme výsledky s funkciou `unwrap`. Nakoniec sa výška rekonštruovaného povrchu o polovicu zmenší, pretože pracujeme s interferometrom na odraz a fázový rozdiel vln je dvojnásobný kvôli dvojnásobnej optickej dráhe signálnej vlny.

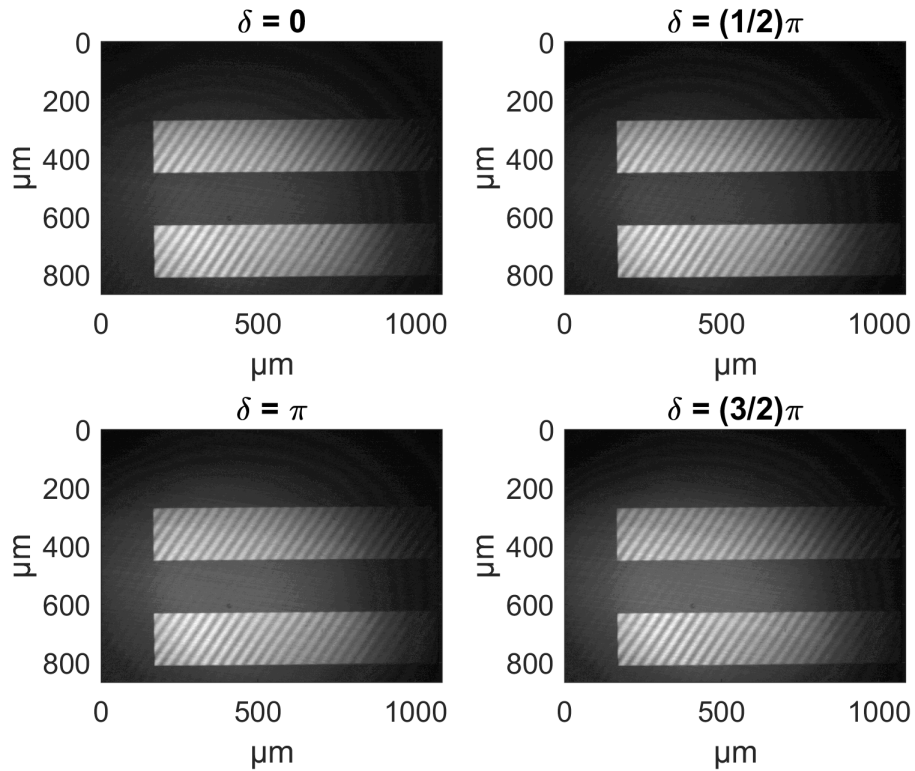
2.4. Experimentálne záznamy

V tejto časti budú prezentované spracované praktické záznamy z laboratória. Vo všetkých záznamoch bola použitá rekonštrukcia $\Delta\varphi$ podľa 1.9 a teda zo štyroch interferogramov.

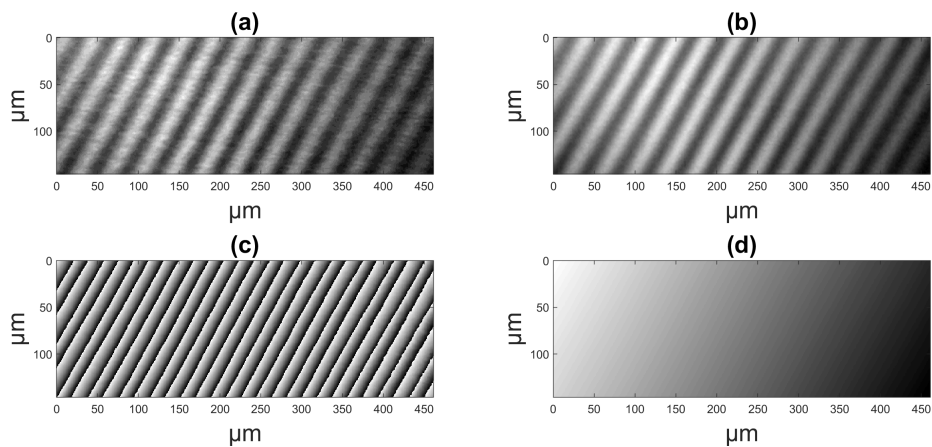
2.4.1. USAF 1951 test

Ako prvý pozorovaný predmet sme vyskúšali odrazný USAF 1951 test (Obrázok 2.6). Použiteľné interferenčné pružky vznikli len na odrazných čiarach testu, oblasť mimo čiar má veľmi malú odrazivosť. Po vyrezaní obrazu z interferenčnej

časti sme rekonštruovali fázový rozdiel $\Delta\varphi$ a naviazali fázu pomocou funkcie unwrap (Obrázok 2.7).

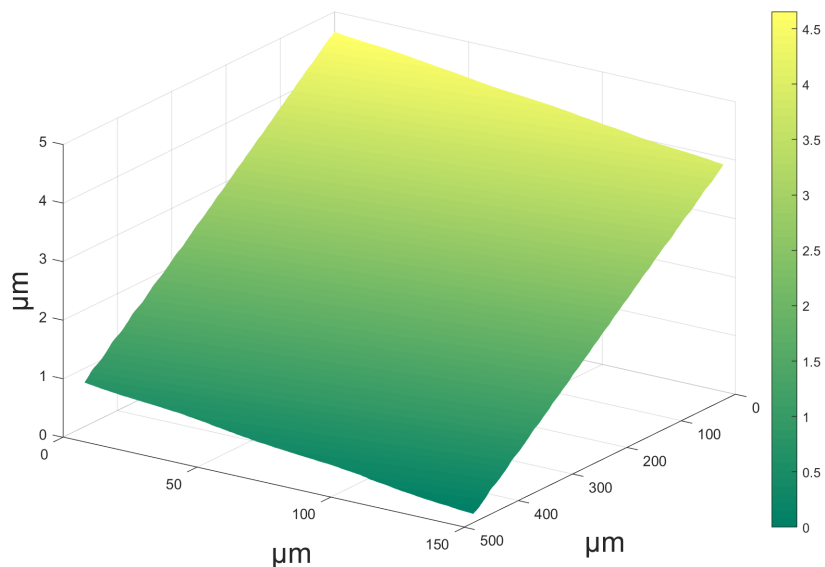


Obrázok 2.6: Interferenčné prúžky na USAF 1951 teste, ktorý má odrazné testovacie čiary. Prúžky sa posúvajú so zmenou δ .

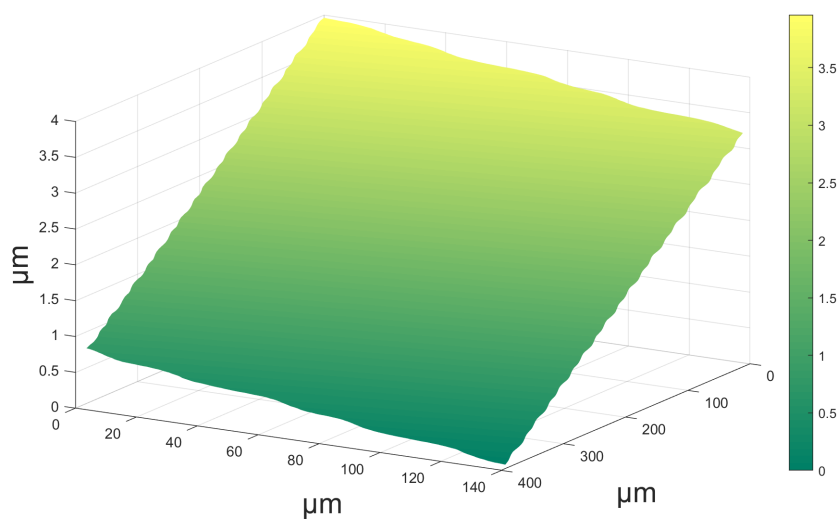


Obrázok 2.7: Výrez časti s interferenčnými prúžkami z celého záznamu (a), priemer 30 interferogramov (b), rekonštruovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ (c) a jeho naviazanie pomocou funkcie unwrap (d).

Taktiež sme tvar povrchu pozorovaného predmetu zobrazili v trojosom súradnicovom systéme (Obrázok 2.8). Pri nesprávnej kalibrácii LCVR alebo jeho nekontrolovanej zmene teploty sa prejavilo v rekonštruovanom obraze periodické zvlnenie (Obrázok 2.9), rovnako ako v simulácii.



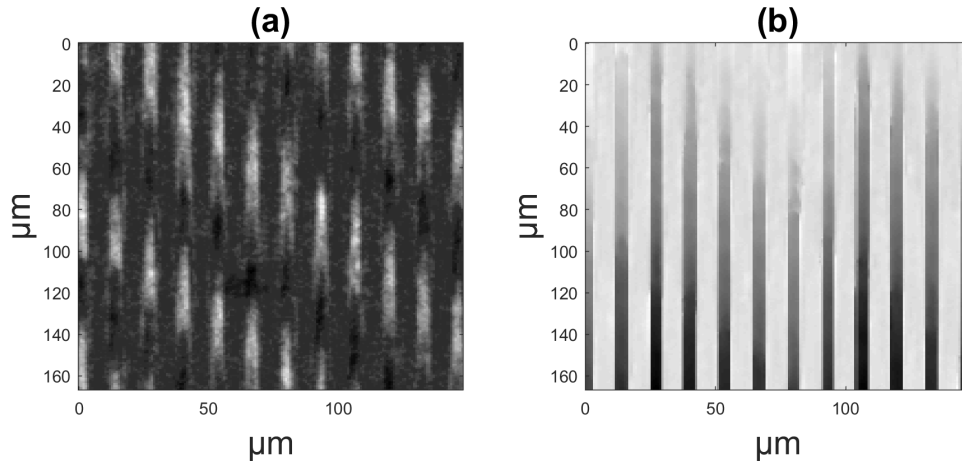
Obrázok 2.8: Rekonštruovaný tvar povrchu pozorovaného predmetu zobrazený v trojosom súradnicovom systéme.



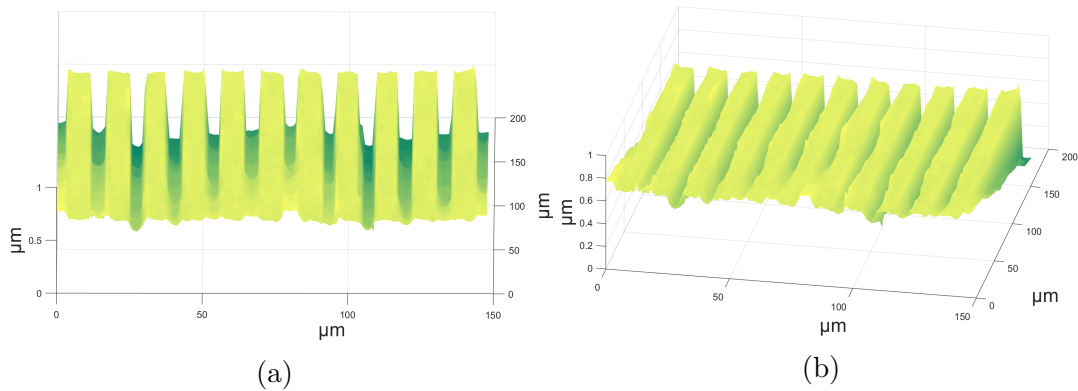
Obrázok 2.9: Zvlnený rekonštruovaný povrch pozorovaného predmetu zobrazený v trojosom súradnicovom systéme.

2.4.2. Difrakčná mriežka

Druhý predmet je difrakčná mriežka s 75 vrypami na mm, používaná pre infračervené pásmo dlhých vlnových dĺžok. Na interferograme (Obrázok 2.10) je vidieť, že je odrazná len v miestach kde nie sú vrypy. Jedná sa o predmet, ktorý nie je možné v použitej optickej konfigurácii plne mapovať, pretože svetlo odrazené od šikmých stien vrypov sa už nevracia do objektívu. Je ale možné s dobrou presnosťou kontrolovať hustotu vrypov. Po naviazaní $\Delta\varphi$ a trojrozmernom zobrazení (Obrázok 2.11) sa vrypy prejavujú ako povrch a naklonený povrch ako šikmé vrypy.



Obrázok 2.10: Interferenčné pružky na difrakčnej mriežke (a) a naviazaný rekonštruovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ (b).



Obrázok 2.11: Povrch difrakčnej mriežky z kolmého pohľadu (a) a šikmého pohľadu (b).

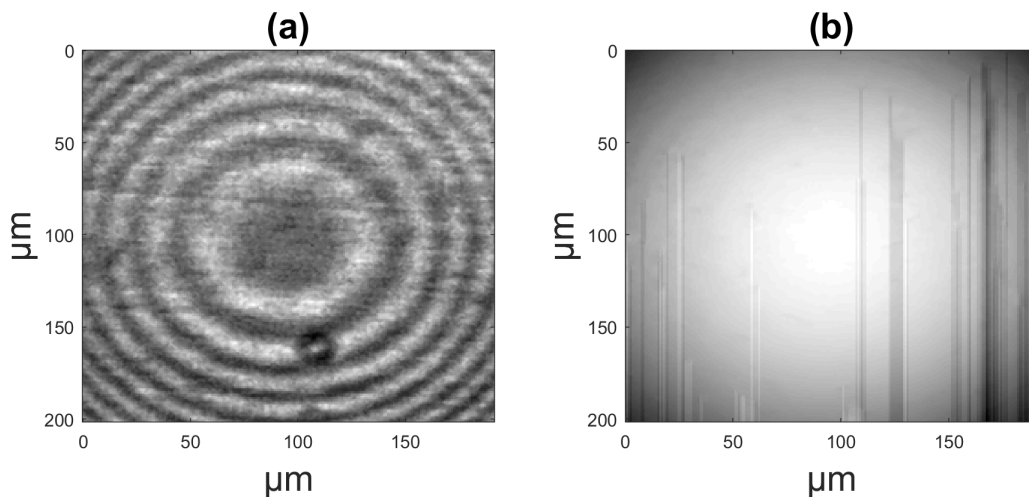
2.4.3. Gulička

Posledný pozorovaný predmet je lesklá kovová guľička s polomerom $r = 4$ mm. Zobrazili sme interferogram a naviazaný rekonštruovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ pomocou funkcie unwrap (Obrázok 2.12). Tu sa prejavil problém pri naväzovaní $\Delta\varphi$, kde sa malá chyba merania natiahla cez celý obraz (Obrázok 2.12b a 2.13a). Pri použití Goldstein algoritmu (Obrázok 2.13b) sa stred obrazu guľičky rekonštruoval výrazne lepšie, ale objavili sa iné artefakty na kraji obrazu, ktoré tiež mohli vzniknúť prudším fázovým skokom a chybou naviazania fázového rozdielu. Na obidvoch trojrozmerných zobrazeniach vidno nehladký povrch meranej guľovej plochy.

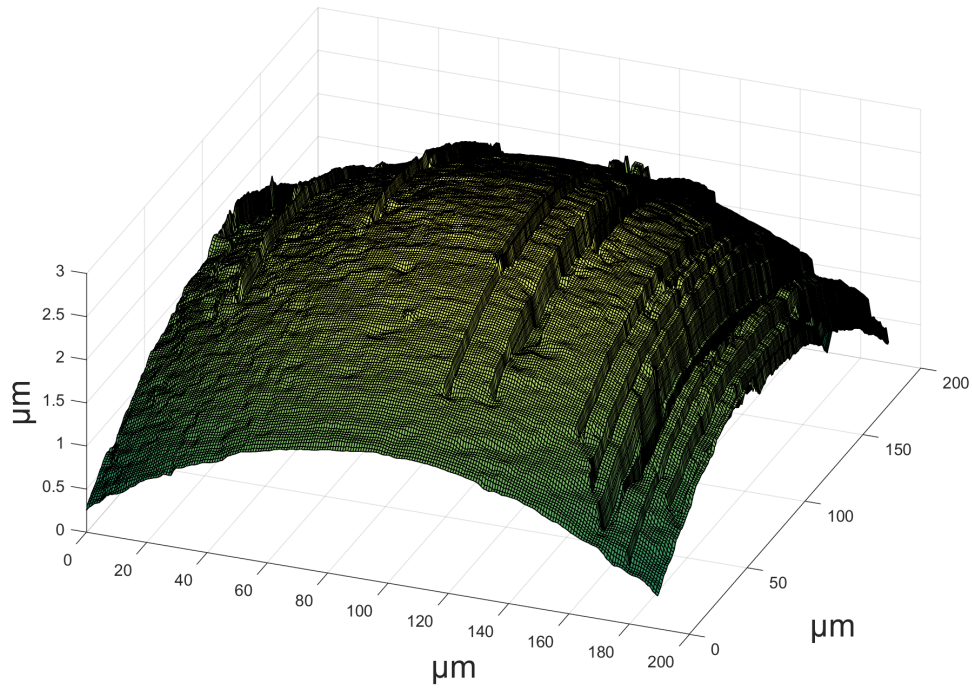
Obraz je v podstate obdĺžniková guľová výseč. Pri nájdení najvyššieho bodu a výbere bodu z okraja je možné pomocou geometrického vzťahu

$$r = \frac{r_0^2 + h^2}{2 \cdot h}, \quad (2.8)$$

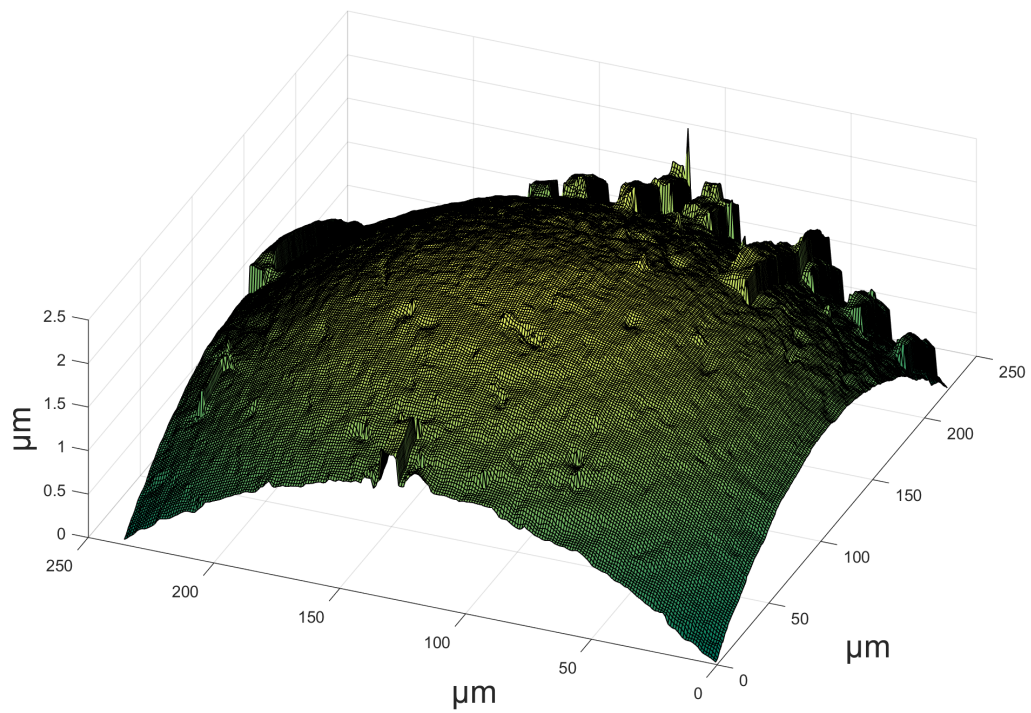
kde r_0 je polomer a h výška guľovej výseče, vypočítať polomer r meranej guľičky. Z našich meraní nám vyšiel $r = 4.22$ mm.



Obrázok 2.12: Výrez interferogramu vzniknutého pri meraní tvaru guľičky (a) a naviazaný rekonštruovaný fázový rozdiel $\Delta\varphi$ pomocou funkcie unwrap (b).



(a)



(b)

Obrázok 2.13: Povrch meranej guľičky, fázový rozdiel $\Delta\varphi$ naviazaný pomocou funkcie unwrap (a) a pomocou algoritmu Goldstein (b).

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vysvetliť optické metódy mapovania mikroskopického povrchu a matematicky popísať a experimentálne overiť princíp interferometrie s fázovým posunom bez mechanicke pohyblivých komponentov s použitím polarizačne citlivého Mirau interferometra.

V teoretickej časti boli popísané rôzne usporiadania interferometrov a ich konfigurácie s mikroskopovým objektívom pre mapovanie povrchu. Boli diskutované výhody a nevýhody rôznych usporiadaní. Bol vysvetlený význam a použitie interferometrie s fázovým posuvom a jej praktická realizácia pre zostavy s mechanicke pohyblivými komponentami a bez nich. Zamerali sme sa na nepohyblivé komponenty a popísali využitie wire grid polarizátoru ako deliča zväzku pre Mirau interferometer s variabilným retardérom z tekutých kryštálov pre zavedenie fázového posuvu medzi referenčnou a signálnou vlnou. Taktiež bola vyskúšaná simulácia interferencie a rekonštrukcia zmeny fázy medzi vlnami v programe MATLAB.

V experimentálnej časti bola popísaná použitá optická zostava pre experiment, jej justáž a postup kalibrácie variabilného retardéru z tekutého kryštálu. Ďalej bol vysvetlený priebeh merania a spracovania záznamov - numerická rekonštrukcia v programe MATLAB, pomocou ktorej sme sa dostali k tvaru povrchu pozorovaného predmetu. Väčšia pozornosť tiež bola venovaná podchytieniu a prípadnej eliminácii rušivých vplyvov, ktoré do merania vnášajú nežiadúce náhodné a systematické chyby.

Možné obmedzenia použitej metódy plynú z vibrácii sústavy, ktoré aj na vibračne odtlmenom optickom stole určitou mierou spôsobuje rotačný difuzér. Ďalej chybným fázovým posuvom medzi signálnou a referenčnou vlnou spôsobeným

zlou kalibráciou alebo natočením variabilného retardéru z tekutých kryštálov. Taktiež sú neznáme polarizačné vlastnosti nepolarizačného deliča zväzku, ktorý podľa našich meraní deformuje ortogonalitu polarizácií signálnej a referenčnej vlny. To môže výrazne negatívne ovplyvňovať možnosť fázovo posúvať len jednu z vln, pretože sa vždy bude čiastočne posúvať aj intenzita z druhej vlny.

Literatura

- [1] Y. Wang , F. Xie, S. Ma, L. Dongn. (2017). Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 93. 164-170.
- [2] D. Malacara, ed. *Optical shop testing*. 3rd edition. New Jersey: Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-48404-2.
- [3] P. Bouchal, R. Čelechovský, Z. Bouchal; Polarization sensitive phase shifting Mirau interferometry using a liquid crystal variable retarder, *Optics Letters*, 2015.
- [4] I. Vyšín, J. Říha. *Paprsková a vlnová optika: studijní modul*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3334-9.
- [5] J. Bajer. *Optika 2*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2018. ISBN 9788090709805.
- [6] P. Hariharan, *Basics of Interferometry*. 2nd Edition. Elsevier, 2007. ISBN 9780123735898.
- [7] M. Pluta. *Advanced light microscopy vol.3*. New York: Distribution for the USA and Canada, Elsevier Science Publishing Co., 1993. ISBN 0-444-98819-x.
- [8] P. Hariharan, *Optical interferometry*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2003. ISBN 0-12-311630-9.
- [9] R. Leach. *Optical Measurement of Surface Topography*. (2011). ISBN 978-3-642-12012-1.
- [10] Ch. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin, Q. Chen. (2018). Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 109. 23-59.
- [11] J. Novak. *New Phase Shifting Algorithms Insensitive to Linear Phase Shift Errors*. (2002).

- [12] J. Novak. Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift. (2003).
- [13] P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju, "Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm," *Appl. Opt.* 26, 2504-2506 (1987)
- [14] Daodang Wang and Rongguang Liang, "Simultaneous polarization Mirau interferometer based on pixelated polarization camera," *Opt. Lett.* 41, 41-44 (2016)
- [15] Wire Grid Polarizers on Glass Substrates [online]. Thorlabs [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/>
- [16] Full-Wave Liquid Crystal Variable Retarders: Performance [online]. Thorlabs [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/>
- [17] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Sci.*, 23(4), 713– 720. (1988)