

Digitální holografický mikroskop se subaperturním sešíváním pro vyhodnocení tribologických měření

Marek Mach <marek.mach@tul.cz>, František Kaván, Marek Stašík

Optická mikroskopie je hojně využívanou analytickou metodou pro mnoho průmyslových aplikací. Standardním mikroskopem nelze získat 3D informaci o topografii povrchu. Pro získání této funkcionality, je nutné rozšířit mikroskop o druhou osvětlovací větev, tzv. referenční větev, a k osvětlení využít zdroj koherentního záření – laser. Tato úprava mikroskopu, zvaná digitální holografická mikroskopie, umožňuje měření topografie povrchu. V kombinaci s metodou subaperturního sešívání umožňuje například měření tribologické stopy při měření vlastností tenkých vrstev.

Klíčová slova: holografie, mikroskopie, metrologie, machine vision, tribologie

Úvod

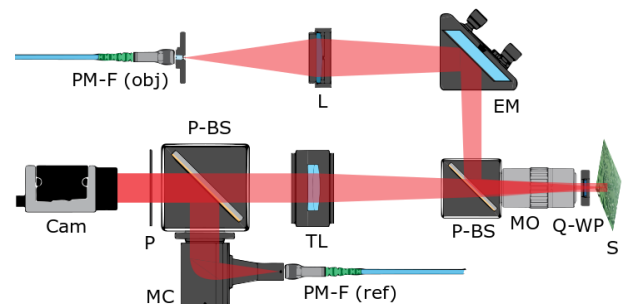
Digitální holografická interferometrie využívá fáze koherentního záření vypočtené ze zaznamenaného interferenčního obrazce – hologram. Měření mohou dosahovat axiální přesnosti až $\lambda/100$ [1], kde λ je vlnová délka použitého světla, což odpovídá přesnosti cca 6 nm při použití červeného laseru. V kombinaci s vysokým laterálním rozlišením mikroskopu okolo 1 μm je možné dosáhnout velmi detailních snímků povrchu. Nevýhodou je ovšem malá snímaná oblast – čtverec s rozměry maximálně jednotek mm. Tento problém řeší metoda sešítí obrazu z více snímků, která je předmětem tohoto příspěvku.

Metodika

Digitální holografický mikroskop je rozšířením klasického mikroskopu. Pro osvětlení je ale použito světlo kolimované pomocí mikroskopového objektivu. To se odráží a ve svojí fázi nese informaci o topografii povrchu.

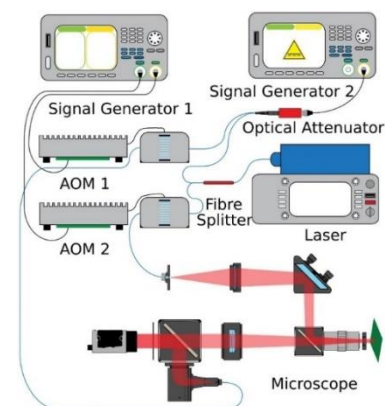
Pro získání této informace je nutné využít techniky digitální holografické interferometrie. Principem techniky je záznam interferenčního obrazce, vniklého interferencí odražené – signální vlny s referenční vlnou, senzorem kamery. Tento interferenční obrazce se nazývá hologram, $H = E_r + E_s$. Kamera zaznamenává pouze intenzitu hologramu. Fáze lze získat využitím techniky řízeného fázového posuvu tzv. phase shifting. Ten spočívá v záznamu hologramů s různým fázovým rozdílem φ .

$$H = I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \Re(e^{i(\phi+\varphi)})$$



Obrázek 1: Digitální holografický mikroskop. PM-F – PM Vláknem, L – Čočka, EM – Eliptické zrcadlo, P-BS – Pelikl (dělič svazku), MO – Mikroskopový objektiv, Q-WP – Čtvrtvlnná destička, S – Vzorek, TL – Tubusová čočka, MC – Kolimátor, P – Polarizátor, Cam – Kamera.

Pokud tedy zaznameneáme 4 snímky s fázovým rozdílem $\varphi = \pi/4$, lze hodnotu fáze vypočítat z jednoduchého vztahu jako $\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$.



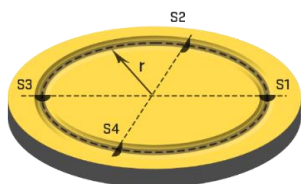
Obrázek 2: Schéma zapojení AOM

Pro zajištění konstantního fázového rozdílu mezi snímky byly použity akusto-optické modulátory (AOM), kde lze fázi záření měnit pomocí změny fáze budícího signálu pomocí generátoru funkcí, jak ukazuje Obrázek 2 [1].

Měření zvolené oblasti probíhá posuvem vzorku po zvolené měřicí trajektorii a záznamu obrazce snímek po

snímku. K posunu vzorku byly použity motorizované posuvy, které umožňují automatické posuvy ovládané z měřicího PC.

Tribologie je obor zabývající se procesy opotřebení. Tribologické testování probíhá nejčastěji metodou ball-on-disk, kde je kulička z určitého materiálu přitlačována na disk s vyhodnocovanou vrstvou a po ní opisuje kruhovou trajektorii. Výpočet opotřebení, stanoveného vydřeným objemem, pak dle normy probíhá jako $V_{wear} = \frac{\pi r(S_1+S_2+S_3+S_4)}{2}$, kde Obrázek 3 vysvětluje význam veličin.



Obrázek 3: Tribologické testování

Subaperturní sešívání dat

Naměřená data jsou tvořena stovkami výškových map se vzájemnými překryvy. Jednotlivé výškové mapy mají velké množství optických vad, které brání přímému napojení map. Tyto vady je nutné vyrovnat na základě vzájemných překryvů. Vady jsou aproximovány pomocí Zernikových polynomů. Za účelem hledání vhodných vah Zernikových polynomů byl vyvinut rychlý algoritmus založený na systému lineárních rovnic. Pravou stranu rovnice tvoří rozdíly naměřených hodnot v překryvech a systémová matice je vyplněna hodnotami Zernikových polynomů. Řešení pak obsahuje váhy Zernikových polynomů, které je potřeba odečíst od jednotlivých výškových map. [2]

Výsledky a diskuse

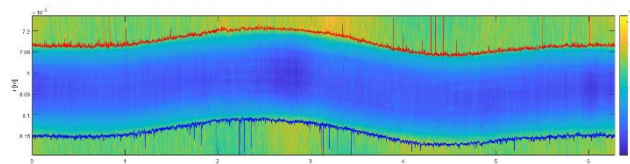
Pro ověření funkčnosti systému byl použit vzorek tenké vrstvy AlTiN, vyrobený na KMT FS TUL. Tento vzorek byl změřen standardními postupy na KMT, a tedy konfokálním mikroskopem (CMF) a kontaktním profilometrem (CP) pomocí metody dané normou – tedy čtyřmi profily a následném výpočtu.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty metod dle normy

METODA	PROFIL 1 [μm^2]	PROFIL 2 [μm^2]	PROFIL 3 [μm^2]	PROFIL 4 [μm^2]	STD [μm^2]
CFM	115.8	106.4	97.9	103.1	7.5
CP	99.0	109.3	86.5	79.0	13.3

Poté byla celá stopa naměřena pomocí DHM s objektivem Mitutoyo 10x po kruhové trajektorii odpovídající tribologické stopě, což bylo s 40%

překryvem celkově 254 snímků. Tyto snímky pak byly převedeny do polárních souřadnic pro snadnější práci a nižší výpočetní náročnost a následně spojeny pomocí metody subaperturního sešívání. Výsledek ukazuje Obrázek 4.



Obrázek 4: Výsledek měření tribologické stopy pomocí DHM

Měření pomocí DHM zachytí celou tribologickou stopu. Je tedy možné velice přesně určit vydřený objem exaktním výpočtem. Z měření pomocí DHM vyšel výsledek $5598 \mu\text{m}^3$, což velice dobře odpovídá standardním metodám (viz Tabulka 1), které mají ovšem vysoký rozptyl daný velkou nejistotou měření profilu s pouze čtyřmi hodnotami.

Závěr

Metoda DHM se subaperturním sešíváním se ukázala jako vhodná k měření tribologických vzorků, jelikož poskytuje vysokou přesnost danou vyhodnocením z celého povrchu. Dále také umožňuje kvalitativně posoudit charakter tribologické dráhy, jako například nehomogenity či porušení vrstvy. Nevýhodou je pak vyšší časová a výpočetní náročnost.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2021. Autoři by tímto chtěli poděkovat Totce Bakalové a Lukáši Voleskému z KMT FS TUL za zapůjčení tribologických vzorků a provedení srovnávacích měření.

Reference

- [1] KREIS, Thomas. Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. Weinheim: WILEY-VCH, 2005. ISBN 35-274-0546-1.
- [2] LI, Enbang, Jianquan YAO, Daoyin YU, Jiangtao XI a Joe CHICHARO. Optical phase shifting with acousto-optic devices. *Optics Letters* [online]. 2005, **30**(2) [cit. 2020-04-14]. ISSN 0146-9592. Dostupné z: doi:10.1364/OL.30.000189
- [3] STAŠÍK, Marek, Pavel PSOTA, Vít LÉDL a Jan KREDBA. Subaperture stitching computation time optimization using a system of linear equations. *Applied Optics* [online]. 2021, **60**(27) [cit. 2021-09-19]. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.433312