

Oponentní posudek dizertační práce pana Ing. Štěpána Šustka *Experimentální studium rozptylu světla na tenkých vrstvách*

Školitel: Prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr., Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Tématem předložené dizertační práce je Experimentální studium rozptylu světla na tenkých vrstvách. Jak je známo, ze znalosti rozptylové charakteristiky (nejčastěji kombinované z reflexní a difúzní složky) je možné určit topografii zkoumaného povrchu i další zajímavé parametry, samozřejmě v závislosti na citlivosti a přesnosti metody, což přináší řadu možných aplikací, např. v rámci systémů tenkých vrstev. K tomuto cíli i předložená dizertační práce, jejíž cílem byl návrh, realizace, spolu s otestováním a aplikováním speciálního měřicího přístroje, tzv. skaterometru goniometrického typu. Práce byla započata pod vedením školitele, prof. RNDr. Miloslava Ohlídala, CSc., po jeho náhlém zesnutí vedení práce následně převzal a dovedl do konce prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr. Jedná se tedy o téma dizertační práce velmi aktuální, srovnatelné s mezinárodní úrovní. Tématika dizertace pokrývá perspektivní a potřebnou problematiku, vhodně zapadající do aktivit Ústavu fyzikálního inženýrství na FSI VUT v Brně. Dizertační práce představuje potřebný a užitečný příspěvek do dané oblasti, nejen pro pracoviště školitele, ale pro širší vědeckou komunitu, včetně možných aplikací. Na předloženou práci bude bezpochyby užitečné dále navazovat. Cíle dizertace jsou uvedeny v samostatné kapitole 3, následujícím způsobem: vývoj přístroje pro měření parametrů topografie náhodně drsných povrchů (drsnoti 0,1 – 1 nm RMS) pro následnou statistickou evaluaci, s využitím předchozích na pracovišti vyvinutých přístrojů. Po prostudování předloženého textu lze konstatovat, že se cíle práce podařilo splnit.

Vymezení práce na studované téma sleduje i obsah členění vlastní práce; posuzovaná práce je na počet stránek poměrně rozsáhlá, má celkem 129 stran, 63 obrázků a několik tabulek, odkazů na literaturu je 48. Dále je ve 4 případech dizertant uveden jako autor publikačního výstupu (v jednom případě jako 1. autor): *Journal of Optics* (prvoautorský, 2021, 5 citací, z toho 4 autocitace), *Applied Surface Science* (2020, 6 citací, všechny autocitace), *Optics Express* (2020, 4 citace, z toho 3 autocitace) a *Coatings* (2019, 13 citací, z toho 9 autocitací).

Práce je členěna do 22 hlavních kapitol, zahrnující kromě povinného Úvodu (kapitola 1), Závěru (kapitola 17) a Literatury (kapitola 19) i řadu dalších pomocných kapitol (Publikační činnost autora, Seznam použitých symbolů, Seznam použitých zkratk, Seznam obrázků). Po až příliš stručném Úvodu (kapitola 1) text pokračuje kapitola 2 - Současný stav poznání, poskytující úvodní představení problematiky (náhodně drsný povrch, techniky pro určování parametrů povrchu). Zde bych očekával poněkud širší a aktuálnější shrnutí problematiky (z 25 citací k této úvodní části je 11 autocitací), spolu s odkazy nejnovější relevantní vědeckou literaturu a podrobnějším zdůvodněním výběru zvolené metody (ARS, angle-resolved scattering) pro studium v rámci dizertace. V následující 3. kapitole jsou velmi stručně představeny cíle dizertace, tedy vývoj skaterometru 3. generace (SM III) a měření parametrů topografie náhodně drsných povrchů (s velikostí RMS drsnoti řádu 0,1 – 1 nm, včetně statistického popisu), opět, bylo by vhodné rozebrat podrobněji. Následující 4. kapitola přibližuje problematiku měření pomocí metody úhlově rozlišené skaterometrie (ARS). Formou technického výčtu se věnuje požadavkům na ARS měření, kalibraci skaterometru, analýze neurčitostí měření ARS a popisu předchozích na pracovišti vyvinutých přístrojů (verze I a II), na který dizertant ve své práci navazuje a vylepšuje jejich omezení. 5. kapitola dále popisuje navržené konstrukční 3 skupiny úprav, které vedly ke konstrukci nové generace skaterometru II a následně III: (1) optická instrumentace pro přípravu laserového svazku (vylepšení kvality laserového svazku pomocí prostorového filtru), (2) technické úpravy goniometru (vhodná trajektorie detektoru, inovace elektromotorů), (3) vylepšení elektroniky (snížení šumových charakteristik, inovace řídicí elektroniky, založené na mikrokontroleru, s využitím Arduino UNO). Tato kapitola je zakončena demonstrací dosažených výsledků (testování pomocí série náhodně drsných izotropních relativně homogenních povrchů s různými statistickými parametry). Získaná data byla ve shodě s nezávislou charakterizací drsnoty pomocí nezávislé techniky mikroskopie atomárních sil (AFM), nebylo ale dosaženo požadovaných přesností. Kapitola 6 (Úprava pro měření ARS tenkých vrstev) následně shrnuje aktivity spojené s vývojem verze III, aplikovatelné na charakterizaci systémů tenkých vrstev. Pro porovnání zde bylo využito systému Albatros TT (Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Jena, Německo), přičemž systém II byl nedostatečně přesný. Byly analyzovány a řešeny příčiny nepřesností (prašnost v okolním vzduchu – filtrační zařízení, rozptyl na optických komponentách, citlivost detektoru, šumy v řídicí elektronice). Kapitola 7 následně shrnuje návrh nového přístroje SM III, kde stanovuje postup návrhu. Kapitola 8 dále řeší detekční část (výběr lavinové diody APD vůči fotonásobiči PMT), kapitola 9 řeší návrh a realizaci komory pro přípravu laserového svazku (řešení pomocí transmisní, respektive reflexní optiky), obdobně kapitola 10 řeší komoru s detektorem a goniometrem. Kapitola 11 se zabývá časovou stabilitou systému SM III, ve 12. části se popisuje justáž a seřízení systému. Tím je zakončena vývojová fáze a dizertant dále v kapitole 13 přistoupil k popisu postupu měření. Výsledky jsou prezentovány v části 14 (Výsledky měření přístroje), s následnou aplikací (ve spolupráci s Ústavem molekulární biologie a radiobiologie, Mendelova univerzita v Brně) v kapitole 15, pro testování měření stresu rostlin. Zde by bylo vhodné uvedení detailnější uvedení do problematiky a zejména alespoň elementární interpretace získaných dat. Celá práce je uzavřena stručným Přínosem pro vědní obor a praxi, Závěrem, přehledem Publikační činnosti dizertanta, přehledem Literatury, a již zmiňovaných užitečných seznamů.

Z odborného hlediska považují práci za přínosnou a velmi užitečnou pro další výzkum. Domnívám se, že dizertant zvládl danou problematiku v celé šíři v obou oblastech a že je schopen další tvůrčí vědecké práce. Dizertant prokázal jak porozumění studované problematice, tak zejména schopnosti řešit technické a experimentální problémy. Myslím si, že výsledky práce mohou být významné pro další praktické využití.

Po formální stránce je práce zpracována na standardní úrovni. Větší pozornost mohla být věnována grafické úpravě, formátování, rozložení obrázků (větší spojitost textu), apod., ale toto nijak nesnižuje samotný přínos práce. Práce je psána

v českém jazyce, slovní vyjádření jsou stručná, v často jednoduchých větách, ale srozumitelná, i když některé aspekty mohly být podrobněji popsány / diskutovány. Formální chyby nejsou časté a vesměs drobného charakteru, využití obrázků, grafů a tabulek je adekvátní, větší péče měla být věnována jejich začlenění do textu a úpravám. Pokud se týká terminologie, nenašel jsem žádné vysloveně problematické či nesprávné použití. V práci bych ovšem několikrát ocenil vyšší kvalitu obrázků, zejména použitých z měření (často jde o kopii přímo generovanou z programu, přístroje, apod.), pro zajištění vyšší přehlednosti a srozumitelnosti. Větší pozornost měla být také věnována matematickým výrazům a rovnicím, i když jich je v práci jen velmi málo, v podstatě na úvodních stranách. Např. na s. 14 je uvedena autokorelační funkce drsného povrchu $B(\tau)$ – v následující rovnici je však definována jako $AF(\tau)$ – rovnice (2.1). Nepříliš šťastné je též označení τ pro vzdálenost dvou bodů. V následující rovnici je definována funkce $C(\tau_x)$ pomocí $B(\tau_x)$, která není definována, atd. Těto úvodní 3 stránkové matematické části měla být věnována větší pozornost. Struktura práce je zvolena vhodně, větší pozornost mohla být však také věnována členění a organizaci kapitol.

Z odborného hlediska považuji práci za přínosnou a užitečnou pro další výzkumné a vývojové aktivity na pracovišti. Uvítal bych místy více fyzikální (než technický) popis, spolu se srovnáním s ostatními technologiemi a obdobnými přístroji. Výsledky práce mohou být dále významné pro další výzkum a vývoj v dané oblasti. Dizertant dle mého názoru zvládl danou technologickou, přístrojovou i experimentálně poměrně náročnou problematiku, čímž prokázal, že je schopen další vlastní tvůrčí / vědecké práce.

Předložená dizertační práce tohoto rozsahu a šíře záběru přináší pochopitelně celou řadu podnětů pro diskuzi, zde bych se omezil jen na následující dotazy a připomínky, k některým z nich by se mohl dizertant v rámci obhajoby vyjádřit.

- 1) Jak už jsem zmiňoval, v úvodní *state-of-the-art* by bylo vhodné srovnání dostupných technologií dosahujících požadovaných parametrů. Obdobně, v rámci technologie ARS skaterometru, uvítal bych srovnání v mezinárodním měřítku. O toto bych dizertanta poprosil.
- 2) Na s. 14, bylo by možné přiblížit hustotu pravděpodobnosti výšek nerovností $w(z_1, z_2, \tau)$, která je deklarována jako dvojdimenzionální (ale skrze τ závisí i na dalších dimenzích).
- 3) Jak jsou definovány prostorové frekvence povrchu f_x a f_y , zavedené v rovnici (2.4)?
- 4) Jaká je filozofie zavedení RMS drsnosti σ – vztahy (2.8) a (2.9)?
- 5) V rámci kapitoly 2.2 je zavedena pro práci klíčová veličina ARS, vztahy (2.15) - (2.17). Mohl by autor komentovat její zavedení?
- 6) Mohl by autor porovnání navrženou a realizovanou filtrační jednotku (kapitoly 6.2.1 a 6.2.2) s laboratorními komerčně dostupnými variantami, dodávanými na klíč?
- 7) V rámci kapitoly 7 – Návrh nového přístroje SM III, je využit plynový laser Coherent INNOVA 70C, z jeho laserových čar se využily 3 čáry: 476, 514 a 647 nm. Jaký byl důvod této volby? Jak se měření na těchto 3 vlnových délkách lišila?
- 8) Jako příklad aplikace vyvinutého skaterometru je v kapitole 15 uvedeno měření ARS účelem studia stresu rostlin. I když zcela rozumím důrazu na konstrukční a vývojové aspekty práce, mohl by dizertant komentovat získané výsledky (stručně uvedeny v 1 grafu, v rámci 1,5 s. textu), zejména v relaci s možnou další aplikací přístroje?
- 9) Konečně, plánuje student pokračovat v dané či příbuzné problematice i v rámci svého dalšího kariérního postupu? Jaké jsou jeho další aktuální plány?

Závěr: Předloženou dizertační práci je možno hodnotit jako vyhovující a z odborného hlediska jako kvalitní, předpokládám uspokojivé zodpovězení vybraných dotazů a připomínek. Stanovené cíle dizertační práce byly splněny. Autor se také poměrně zdařile vyrovnal s nenadálým odchodem původního školitele a práci dokončil pod vedením školitele nového. Práce přináší nové poznatky a je přínosná jak z hlediska vývoje, tak pro praktické aplikace. **Závěrem mohu prohlásit, že předložená dizertační práce splňuje požadavky na tyto práce kladené příslušnými právními předpisy. Práci proto doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu doporučuji udělení akademicko-vědeckého titulu PhD.**

Ivan Richter
KLFF FJFI ČVUT

V Praze dne 6. září 2024

Prof. Ing. Ivan Richter, Dr.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra laserové fyziky a fotoniky
Břehová 7, 115 19 Praha 1