

VÁŠ DOPIS ZN.:  
ZE DNE: 26. 6. 2024  
NAŠE ZN.:

VYŘIZUJE: Miroslav Valtr  
TEL.: +420 545 555 337  
E-MAIL: mvaltr@cmi.cz

DATUM: 4. 9. 2024

Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta strojního inženýrství  
Studijní oddělení  
Iva Kvapilová  
Technická 2  
616 69 Brno

## Oponentní posudek disertační práce

Doktorand: Ing. Štěpán Šustek

Téma práce: Experimentální studium rozptylu světla na tenkých vrstvách

Školitel: prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr.

Oponent: Mgr. Miroslav Valtr, Ph.D.

Předložená disertační práce se zabývá konstrukcí, resp. zdokonalením přístroje, sketerometru, pro optickou analýzu drsnosti povrchů různých materiálů na základě měření úhlového rozdělení rozptylu světla. Studium rozptylu je, dle mého názoru, aktuální téma, které najde uplatnění v mnoha oborech vědeckého výzkumu. Pro příklad můžeme zmínit oblast optického průmyslu, kde rozptyl světla na funkčních povlacích optických prvků do značné míry ovlivňuje parametry výsledného produktu (čochy, hranolu, filtru...). Aktuálnost práce dokládá i zájem ze strany firmy MEOPTA – optika, s.r.o., se kterou má pracoviště, kde působí i doktorand, dlouholetou spolupráci. Dále můžeme uvést oblast Automotive, kde kvalita povrchů významně ovlivňuje např. odrazivost v reflektorech světlometů, nebo oblast polovodičů, kde opět kvalita povrchů křemíkových desek má vliv na výsledné integrované obvody.

Cílem práce byla stavba další generace přístroje, který umožní změřit parametry topografie náhodně drsných povrchů s drsností v řádu jednotek až desetin nanometru. Po úvodní kapitole autor přikročil k teoretickému popisu náhodně drsných rozhraní a zavedl funkce a veličiny, které lze následně pomocí sketerometru změřit. Autor se také zaměřil na srovnání různých optických metod pro určování parametrů povrchu. V kapitole 3 jsou definovány cíle práce, v kapitole 4 se pak autor věnuje samotnému měření Rozptylové distribuční funkce (ARS), tj. požadavkům na kvalitní sketerometry, jejich kalibraci a analýze neurčitosti měření ARS. V této kapitole je i popsán vývoj předchozích generací přístroje. Následuje kapitola 5, kde jsou popsány konstrukční úpravy přístroje, na kterých se podílel i sám doktorand. Úpravy se týkaly laserového svazku He-Ne laseru, kdy bylo snahou dostat ideální gaussovské rozložení intenzity v rámci svazku pomocí prostorového filtru. Další úpravy se týkaly goniometru, kde došlo k výměně elektromotorů za

silnější a rychlejší elektromotory a souvisejícího chlazení a byl zde připevněn i nový mechanismus, který umožňuje justaci studovaného objektu ve více osách. S výměnou elektromotorů bylo třeba upravit i řídicí elektroniku. Byl tedy sestaven nový kontrolér, který využívá open-source platformu Arduino. Součástí 5. kapitoly je i porovnání s mikroskopíí atomové síly (AFM). Za tímto účelem byly vyrobeny křemíkové destičky s různou drsností na povrchu, vzorky byly změřeny na sketerometru a ze závislosti ARS byly vypočteny hodnoty drsnosti. V tabulce 5.1 je pak srovnání s hodnotami, které byly zjištěny pomocí AFM, kde lze konstatovat velmi dobrou shodu.

V následujících kapitolách autor popisuje úpravy sketerometru pro měření rozptylu na tenkých vrstvách, kterou označuje jako 3. generaci přístroje – SMIII. Autor postupně řeší rozptyl na prachových částicích, který omezuje dynamický rozsah přístroje směrem k nízkým intenzitám rozptýleného světla. Autor tedy postupně vyvinul bezprašnou buňku s příslušným systémem filtrace vzduchu a větráním. Další změna spočívala ve výměně laseru, který má vyšší výkon a emituje na více vlnových délkách. Došlo i k výměně detektoru, kde stávající fotodiodu nahradila lavinová fotodioda, která má velmi dobrý poměr signálu k šumu. Autor řešil také přípravu laserového svazku před dopadem na vzorek, kde se přešlo od transmisní optiky k reflexní, což zmenšilo počet optických rozhraní a zmenšilo tedy i nežádoucí rozptyly světla na jednotlivých optických komponentech. V kapitole 10 je řešen goniometr a polohování detektoru, následovala kapitola 11, kde se autor zaměřil na studium fluktuací ve výkonu laseru. V kapitolách 12 a 13 je diskutováno seřízení přístroje, jeho ovládání a justáž. Velmi důležitá je kapitola 14, kde autor srovnává měření na sketerometru s měřeními provedenými na Fraunhoferově institutu pro aplikovanou optiku a jemnou mechaniku v Jeně. Z výsledků na obr. 14.1 lze říci, že shoda je na velmi dobré úrovni a autor tedy prokázal, že postupnými úpravami modifikoval přístroj tak, že je svými parametry srovnatelný s přístrojem na tak významném pracovišti jakým je Fraunhoferův institut. V 15. kapitole autor demonstruje použití přístroje i v oblasti biologie rostlin, kdy srovnává ARS naměřené na vzorcích sazenic ječmene vystavených různým stresujícím faktorům.

Co se týče formální úpravy, práce je psána srozumitelnou formou s velkým množstvím detailů. Musím ale bohužel konstatovat, že obsahuje velké množství překlepů, chybějících čárek mezi větami, či dokonce hrubých chyb. Je škoda, že se autor dostatečně nevěnoval jazykové úpravě a nepodrobil text jazykové korektuře. Práce takového významu by si to rozhodně zasloužila. Chyby jsem našel i v popisích obrázků, např. popis obrázku 5.2 na str. 29 je zjevně nedokončený, nebo i v citacích – pod číslem 26 měla být diplomová práce a práci v citaci [45] není možné na uvedeném odkazu nalézt. Citace [94], resp. správně [49] chybí úplně. Autor by si rovněž měl dát pozor na psaní zkratk, např. ASR vs ARS ve vzorci 2.16 nebo PDB vs PTB v legendě grafu na obr. 6.3 a uvést používané zkratky v seznamu na str. 126 – ND, UV, VIS, AFM, atd. Ke členění práce bych měl jednu poznámku, práce je organizována chronologicky, tj. autor popisuje úpravy na 2. generaci přístroje a uvádí výsledky dosažené s tímto přístrojem, následuje pak popis úprav v rámci 3. generace a dosažené výsledky s touto modifikací. Dle mého názoru by bylo přehlednější popsat všechny modifikace v rámci jednoho oddílu a analogicky v druhém oddíle shrnout všechny výsledky.

Předložené teze vhodným způsobem sumarizují konstrukční úpravy přístroje a prezentují dosažené výsledky. I zde je však potřeba se zaměřit na jazykovou korekturu textu. Doporučil bych také, aby se podkapitola Cíle práce pozvedla na samostatnou kapitolu a objevila se tak v Obsahu. Za zvážení stojí i reorganizace textu ve smyslu požadovaného členění na „zvolené metody zpracování“ a „hlavní výsledky práce“ analogicky ke komentáři ke členění samotné disertační práce uvedeném výše. V pokynech pro přípravu tezí, které jsou dostupné na webu VUT, je uveden i požadavek na maximální počet 30 stran, předložené teze mají 35 stran.

Na autora práce bych měl několik dotazů:

- V tabulce 5.1 byly srovnány hodnoty drsnosti určené jednak sketerometrem a také pomocí AFM. Proběhlo srovnání i autokorelační délky? Je to parametr T, který vystupuje ve vztahu 2.12 na str. 16.

- Jaký nejmenší rozptylový (polární) úhel lze při měření použít? Na měření z PTB jde vidět (např. na obr. 14.1), že mají data i pro zpětný odraz od vzorku. Je autorovi známo, v čem je konstrukce přístroje v PTB jiná?

- Mohl by autor více okomentovat výsledek porovnání prezentovaný na obr. 14.1, zejména srovnání na datech ze vzorku WD4050? Pro rozptylové úhly cca  $-56^\circ$  (a symetricky pro kladný úhel) je možné na datech ze sketerometru SMIII pozorovat „schodek“. Pro větší úhly jsou pak hodnoty ARS větší než hodnoty zjištěné přístrojem v Jeně. Jaká byla vinová délka světla?

- Chystá se nějaká publikace, která by se týkala výsledků pořízených 3. generací sketerometru? Poslední publikace je z r. 2021 a týkala se výsledků získaných na předchozí generaci přístroje.

Závěrem lze konstatovat, že bylo dosaženo stanovených cílů a že autor prokázal schopnost samostatné vědecké práce. Přístroj má velký potenciál využitelnosti v mnoha výzkumných oblastech. Navrhuji proto práci doporučit k obhajobě a udělení akademického titulu Ph.D.

V Brně dne 4. 9. 2024

Mgr. Miroslav Valtr, Ph.D.

