

**Posudek doktorské disertační práce Ing. Ondřeje Matouška,
„Interferometrie s řízenou změnou fáze pro měření vlastností
planparalelních optických elementů“**

posudek oponenta

Zaměření doktorské disertační práce Ing. Ondřeje Matouška je orientováno na metrologii optických ploch interferometrickými technikami. Jedná se o perspektivní téma s ohledem na současný technologický vývoj v optické výrobě, kdy nároky na přesnost obrábění a leštění povrchů roste s nároky na rozlišení optických soustav. V neposlední řadě také s ohledem na rostoucí komplexitu návrhů optických systémů využívajících ve větší míře možnosti simulací a výroby jiných, než tradičních rovinných a sférických povrchů. Asférická a tzv. „free-form“ optika představuje v současné době významný technologický posun v optických systémech a soustavách.

Jakákoli přesná optická výroba se ovšem neobejde bez nástrojů pro přesné měření optických povrchů a tvarů. Pokud jde o tradiční sférické a rovinné povrchy, je k dispozici řada komerčních systémů využívajících Twyman-Green, nebo častěji Fizeau interferometry, které nabízejí subnanometrové rozlišení na plochách s optickou kvalitou povrchu a deformací, která se liší jen málo od ideální sférické, nebo rovinné plochy. Není-li podmínka této malé odchylky splněna, nebo nacházejí-li se na měřené ploše diskontinuity, stává se měření tvarů velkým problémem. Částečným řešením jsou interferometrické systémy měřící plochy po malých částech spojovaných „sešíváním“, ale absolutní měření tvarů, schopné vyrovnat se s diskontinuitami, na trhu neexistuje. Předkládaná disertační práce Ing. Ondřeje Matouška nabízí právě takovéto řešení.

Autor se ve své práci zabývá problematikou řešení interferometrů pro měření optických soustav s více odraznými plochami a pro měření nehomogenit rozložení indexu lomu ve fázových objektech. Takováto měření vytvářejí interferenční obrazce s vícenásobnými proužky. Jejich separaci řeší autor prostřednictvím laditelných laserových zdrojů a algoritmů využívajících frekvenční filtraci. Hlavní přínos práce lze pak vnímat v navrženém a experimentálně ověřeném principu pro absolutní interferometrické měření tvarů optických ploch využívající přeladitelných laserových zdrojů a postupné extrapolace ladicího rozsahu jednotlivých laserů přinášející zpřesnění měření až na úroveň jednotlivých interferenčních proužků.

Dizertační práce Ing. Ondřeje Matouška je přehledná, je psána srozumitelným jazykem a jazyková úroveň je dobrá. Autor v úvodní části popisuje interferometrické měřicí metody optických povrchů, popisuje techniky měření soustav s více odraznými plochami a měření fázových objektů a následně prezentuje metodu zpřesnění absolutního měření s přeladitelnými lasery. Výsledky v práci prezentované mají zřejmý aplikační potenciál a s velkou pravděpodobností naleznou uplatnění přímo na pracovišti, kde práce vznikla – v centru TOPTEC, přičemž jistě nebudou bez zajímavosti pro všechny výrobce přesné optiky.

Po grafické a formální stránce je práce zdařilá, grafická úroveň obrázků je dobrá, diagramy a tabulky jsou dobře čitelné a přehledné. Doktorand Ing. Ondřej Matoušek v předkládané práci prokázal, že zvládl metodiku vědecké práce, prostudoval četnou literaturu k tématu a přinesl ve své práci výsledky, které představují významný přínos ve svém oboru a to jak v teoretickém popisu interferometrických technik, tak i na poli experimentální práce. Ve své dizertační práci předložil výsledky, jenž byly prezentovány na velkém počtu mezinárodních konferencích a v podobě článků ve sbornících, kde je v několika případech Ing. Ondřej Matoušek prvním autorem. Lze předpokládat, že tedy Ing. Ondřej Matoušek zvládl prezentaci na mezinárodním fóru nejen v podobě posterů, ale i formou přednášek v anglickém jazyce.

Na základě výsledků prezentovaných v dizertační práci se domnívám, že doktorand Ing. Ondřej Matoušek prokázal schopnosti a odborné kvality nutné k udělení titulu Ph.D. Dizertační práci považuji za zdařilou a jednoznačně ji doporučuji k obhajobě a taktéž doporučuji udělení titulu Ph.D.

Pro obhajobu dizertační práce Ing. Ing. Ondřeje Matouška bych uvedl následující dotaz:

- Popište, prosím, podrobněji techniku navázání extrapolovaného rozsahu přeladění laditelné laserové diody na ladicí rozsah další diody s blízkou vlnovou délkou a to bez ztráty informace o interferenčním řádu.

V Brně, 30. dubna 2018



prof. Ing. Josef Lazar, Dr.
Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i.



Posudek disertační práce Ing. Ondřeje Matouška

Interferometrie s řízenou změnou fáze pro měření vlastností planparalelních optických elementů

Předložená disertační práce se zabývá rozvojem metod pro měření vlastností planparalelních optických elementů, a to jak měření tvarových odchylek, tak i nehomogenit indexu lomu. Takovéto téma je velmi aktuální a vyřešení tohoto problému může mít dopad v řadě aplikací. Hlavní přínos práce je v tom, že byla navržena, simulována a realizována interferometrická metoda, která umožní současné měření tvaru přední i zadní plochy optického prvku i relativního rozložení indexu lomu. To vše s velkou, dříve nedosažitelnou, přesností. Práce je fyzikálně - technicky orientovaná. Za svůj cíl si kladla složitý, zatím nevyřešený úkol, který se podařilo splnit.

V první, úvodní a rešeršní kapitole autor rozebírá principy a možnosti využití interferometrie pro měření optických planparalelních prvků, možnosti vytvoření definovaného fázového posuvu pomocí piezoelektrických elementů a laděním vlnové délky laseru pomocí změny teploty.

Ve druhé kapitole je popsán Fizeaův interferometr, který autor modifikoval přidáním dalšího referenčního prvku. Takže už tady začíná vlastní práce autora, který navrhl modifikovaný interferometr s jedním referenčním prvkem (2 paralelní plochy) před testovaným vzorkem a druhým za vzorkem. Takovéto uspořádání interferometru je v principu schopné dodat požadované komplexní informace o vzorku – tvaru přední i zadní plochy, jeho tloušťku v daném místě, index lomu i plošné rozložení nehomogenit indexu lomu. Zisk těchto informací je vykoupen tím, že výsledný interferenční obrazec je superpozicí 6 interferenčních obrazců od všech ploch rezonátoru, a jako takový ho nelze vyhodnotit z jednoho statického měření. Klíčovou, kvalitativně novou myšlenkou celé práce je to, že když pro dvojici povrchů v rezonátoru vytvoříme odlišný fázový posuv a budeme-li měnit vlnovou délku laseru, dojde pro každý interferogram k posuvu proužků v obraze různou rychlostí. Tento předpoklad není triviální a nebylo dopředu jasné, zda povede k řešení problému. Bylo nutné zvolit unikátní polohy optických prvků v rezonátoru, testovaly se optimalizační metody separace dílčích interferogramů. Takovýto postup vedl k cíli a umožnil určit jak tvarové vlastnosti, tak i rozložení indexu lomu uvnitř vzorku z vyhodnocených interferenčních dat. Matematické metody byly testovány na simulovaných datech.

Ve třetí kapitole byly na simulovaných datech zkoumány možné parametry připravovaného experimentu. Ve čtvrté kapitole je popsán experiment se vzorky s lokálními vadami indexu lomu, které je možné detekovat i standardně dostupnými metodami. Výhodou nové autorovy metody je to, že v jediném měřicím cyklu lze získat veškeré informace o vzorku bez jakékoliv manipulace s ním, včetně celoplošné informace o tloušťce optického prvku, nezávisle na indexu lomu. Metoda zároveň zobrazuje rozložení indexu lomu i umožní určit jeho absolutní velikost.

Pro testování metody byl vyroben speciální stupňovitý element s výškovými přechody $5\text{ }\mu\text{m}$ a $2\text{ }\mu\text{m}$. Ten byl potom hodnocen navrženou metodou, jak je popsáno v páté kapitole. Výsledky měly nižší rozlišení, nežli se očekávalo, ale přesto přinesly velmi užitečnou informaci o absolutní vzdálenosti elementu od referenční roviny, což je klasickou relativní interferometrií nedosažitelné. Pro zpřesnění absolutního měření optické vzdálenosti byl navržen a ověřen originální postup, který data naměřená při různých vlnových délkách jen prostě neprůměruje, ale vzájemně je napojuje. To umožnilo získat jedinečnou informaci o absolutní vzdálenosti prvku od referenční roviny s přesností, srovnatelnou s relativní interferometrií.

V poslední šesté kapitole autor zkombinoval současné měření více povrchů a metodu absolutního měření optické vzdálenosti. Při jediném upevnění vzorku do interferometru je změřen tvar obou čelních ploch, rozložení indexu lomu a celoplošná fyzická tloušťka.

Autor odvedl velké množství systematické práce, jak v oblasti teoretické, tak i v matematických simulacích. V experimentech porovnával kriticky výsledky získané svojí univerzální metodou s výsledky, získanými dostupnými dílčími metodami. Celá práce vedla k jednoznačnému závěru – k nové důležité metodě, přinášející nové možnosti měření planoparalelních optických prvků, zvláště potom absolutních hodnot tvarových odchylek i homogenity indexu lomu s velmi vysokou přesností.

Předložená práce je po formální stránce velmi dobré kvality. Je přehledná, je vhodně členěna do jednotlivých kapitol, které na sebe dobře navazují a proto se dobře čte. Obsahuje množství obrázků, fotografií a grafů, které vhodně doplňují text. Všechny obrázky jsou velmi přehledné a ilustrativní. Popisky obrázků jsou dostatečné a přesné, odkazy na obrázky jsou správně umístěny v textu. Velké množství rovnic je vysázeno pečlivě a přesně.

Pravopisné chyby a překlepy se vyskytují sporadicky. Např. strana 11, imaginární jednotka je značena i v rovnici (1) a j v textu, strana 38, obrázek 17, um místo μm , strana 56 stěno – stěnou, strana 60 pohybujícím se proužků – proužkům, strana 60 trval – trvalo. Někde chybí čárky, zvláště požitě jako interpunkční znaménka, oddělující vložené věty.

Odborná terminologie je používána správně. Jenom často v práci používaný výraz kavita bych nahradil slovem rezonátor. Na straně 59 je vlnová délka určena na příliš velký počet platných čísel. Na straně 68 difference je $3,4 \cdot 10^{-21} \text{ m}$, asi má být $3,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

Seznam literatury je dostatečný, práce jsou citovány korektně, u některých zdrojů, např. u vlastní publikace [40], chybí další údaje, u [18] chybí ISBN a rok vydání.

Na doktoranda mám tento dotaz:

1. Nezkoušel jste do optického schématu přidat ještě jeden Michelsonův interferometr s kalibrovaným rozdílem délek ramen? Potom by bylo jednodušší určit absolutní hodnotu vzdálenosti z podílu frekvencí, naměřených ve vašem uspořádání, k frekvenci, naměřené v referenčním interferometru. Obdobné metody se používají pro absolutní frekvenční skenovací interferometrii.
2. Má nějaký vliv na vaši metodu koherenční délka použitých laserů? Jaká byla ve vašich měřeních?
3. Jak jste měnil pracovní teplotu laserů?
4. V jakém matematickém programu bylo provedeno matematické modelování měřícího uspořádání?

Z předložené práce je vidět, že autor si studovanou problematiku plně osvojil, a že vykonal i velké množství systematické práce. Disertační práce Ing. Ondřeje Matouška splňuje předpoklady k udělení titulu Ph.D. Autor prokázal předpoklady k samostatné vědecké práci a zároveň aktivně přispěl k rozvoji znalostí v tomto oboru. Práce je ucelená a přináší zcela novou metodu interferometrického měření kvality povrchů a homogenity indexu lomu optických planoparalelních prvků.

Doporučuji přijetí předložená práce k obhajobě.



v Liberci, dne 26.5.2018

doc. RNDr. Miroslav Šulc, PhD.