

Oponentní posudek dizertační práce Ing. Marka Macha
Development of methods for measuring the spatial
distribution of the refractive index using on-chip tomography

Školitel: prof. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií TUL v Liberci

Předložená dizertační práce pana Ing. Marka Macha, vykonaná na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií TUL v Liberci, je věnována výzkumu v oblasti metod měření prostorového rozlišení indexu lomu transparentních materiálů. Podařilo se vyvinout a optimalizovat (1) jednak metodu digitální holografické tomografie v Mach-Zehnderově uspořádání s mikroskopovými objektivy (MZDHT), dále (2) kompaktní bezčočkový digitální holografický interferometr (Fizeauovo uspořádání), FDHI, a (3) zejména metodu tzv. on-chip tomografie (MZDHT-on-chip), s využitím optického vlnovodu. V této metodě se podařilo efektivně zkombinovat DHI, on-chip mikroskopie s výpočetní tomografií. Metody byly ověřeny na řadě vzorků, zejména na feroelektrickém monokrystalu periodicky polovaného niobičnanu lithného (PPLN). Podařilo se tak vylepšit důležité experimentální parametry: rozlišení, zorné pole, objem, doba měření, atd. Hlavní cíle dizertační práce, představené v kapitole 4, tak byly bezpochyby splněny. Tyto navržené a realizované metody představují, díky svým novým fyzikálním vlastnostem, perspektivní a efektivní část fyzikálně materiálového výzkumu v oblasti nanotechnologií, nejenom z pohledu nových možností, ale zejména nových aplikací, v mnoha oborech. Jedná se o téma dizertační práce velmi aktuální, řešené na mezinárodně srovnatelné úrovni. Dizertační práce tak představuje potřebný a užitečný originální příspěvek do dané vědní oblasti, nejen pro pracoviště školitele, které se systematicky danou oblastí zabývá, na předloženou práci bude bezpochyby užitečné dále navazovat v širším měřítku.

Posuzovaná dizertační práce má 107 stran, obsahuje 39 obrázků, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 137. Práce je členěna do 6 hlavních, číslovaných kapitol, součástí je též česká a anglická anotace, seznam obrázků, tabulek a zkratk, přehled použité literatury a přehled autorových publikací. Jak je z práce i samostatného seznamu vlastní literatury v závěru práce patrné, autor dizertace publikoval v rámci tématu dizertace celkem 2 publikace v impaktovaných časopisech (*Optics Express*, *Applied Optics*), dále 1 konferenční recenzovaný článek a jeden článek v českém recenzovaném časopise (*Jemná mechanika a optika*). Dizertant je také spoluautorem dalšího článku v impaktovaných časopisech (*Applied Optics*), několika sborníkových příspěvků na relevantních mezinárodních konferencích a článku v *Jemné mechanice a optice*.

Po úvodní části (kapitola 1) se autor ve 2. kapitole zabývá představením zkoumaných metod DGI, výpočetní tomografie, tomografická rekonstrukce, on-chip zobrazování, spolu s prezentací současného stavu poznání v daných oblastech. Ve 3. části autor definuje otevřené problémy, které je třeba dále řešit, což dokumentuje ve 4. kapitole, kde jsou představeny cíle dizertační práce. Vlastní výsledky práce jsou podrobně představeny v nejdůležitější 5. kapitole, která se sestává ze 7 částí: nejprve se věnuje popisu vzorků – měřených objektů, dále průběhu vyhodnocení, analýze vlivu limitovaného rozsahu intervalu projekcí na tomografické vyhodnocení, a dále již po řadě výsledkům ve 3 částech aktivit, tedy: MZDHT, FDHI a MZDHT-on-chip. Ve všech 3 případech je nejprve popsáno vyvinuté zařízení a následně jednotlivé experimenty na příslušných vzorcích. Výsledky práce jsou diskutovány v 6. kapitole, nejprve samostatně ve 3 zkoumaných oblastech, poté je předložen souhrnný závěr celé práce. Práce je formálně zakončena přehledem použité literatury (nečíslovaná kapitola, 137 položek) a přehledem autorových publikací.

Co se týče formální stránky, práce je vypracována standardním, velmi pěkným způsobem. Co se týče formální i stylistické úrovně českého jazyka, v němž je práce napsána, je na vysoké úrovni. Text práce neobsahuje v podstatě žádné překlepy a formální chyby. Využití obrázků a grafů je adekvátní a efektivní. Dle mého názoru je struktura vlastní práce zvolena vhodně, text je dostatečně podrobný, diskutující konkrétní výsledky. Struktura vlastní práce je zvolena vhodně, text je vyváženou kombinací obecných teoretických definic a jejich aplikací, spolu s přehledem výsledků, tomu odpovídá i vhodné členění do kapitol textu.

Pokud se jedná o věcnou stránku práce, je zřejmé, že cíle předložené diplomové práce, tak jak byly zadány, byly bezpochyby splněny. Z odborného hlediska tak považují práci za jednoznačně přínosnou a užitečnou pro další výzkum, v rámci pracoviště i v širším kontextu. Jsem dále přesvědčen, že výsledky mohou být velmi významné pro další pokračování výzkumu. Dizertant tak dle mého názoru zvládl danou experimentálně velmi náročnou problematiku, v celé šíři tak, že je schopen vlastní vědecké práce.

K předložené diplomové práci mám následující dotazy, k některým z nich by se dizertant mohl (pokud tak již nebude učiněno v rámci vlastní prezentace) v rámci obhajoby vyjádřit:

- 1) Jak vychází přesnost vyhodnocení fáze z hlediska porovnání metod PS a SCPS?
- 2) Rád bych poprosil o vyjasnění provádění praktického výpočtu inverzní Radonovy transformace, rovnice (2.20) a (2.21). Je možno při tom využít i Fourierovy transformace (jejíž výpočet bývá často numericky optimalizován a je velmi rychlý).
- 3) Je možné v rámci metod IRT a FBP uvažovat aplikaci nějakého vhodného iterativního algoritmu, ve vazbě na Fourierovu transformaci (např. IFTA – Iterative Fourier transform algorithm, Gerchberg – Saxton)?
- 4) Bylo by možné blíže vysvětlit rovnici (2.22), v rámci popisu metody on-chip zobrazování. Jak se tato rovnice aplikuje?
- 5) Je možné komentovat vztah v práci vyvinutých technik DHI + OCM + CT k metodám zobrazování s vysokým rozlišením (*super-resolution*) a metodám konfokální mikroskopie?

- 6) V práci je též zmíněna jako alternativa tzv. CSHG technika (metoda Čerenkovovy generace 2. harmonické). Lze stručně komentovat princip a využití této metody?
- 7) Jaký byl důvod zkoumání vzorku MGS (modelový skleněný vzorek) se schodovitou strukturou?
- 8) V rámci aktivit vyhodnocení IRT, v rámci rozsahu projekcí a různých intervalů pro zpětnou projekci, lze určit vazbu na velikost rozsahu frekvencí? Lze v této souvislosti uvažovat o nějakém vhodném „*Figure of merit*“, pro posouzení kvality rekonstrukce?
- 9) Mohl by dizertant komentovat, viz shrnující tabulka 6.1 – srovnání metod, jaké vidí možnosti další optimalizace optického vlnovodu a difrakční mřížky, v rámci metody *MZDHT-on-chip*, pro dosažení lepších výsledků – citlivost na deformaci vlnoplochy?
- 10) Konečně, plánuje student pokračovat v dané či příbuzné problematice i v rámci svého dalšího kariérního postupu? Jaké jsou jeho aktuální plány?

Závěr: Předloženou dizertační práci je možno hodnotit velmi pozitivně, z odborného hlediska jako vysoce kvalitní, předpokládám také uspokojivé zodpovězení vybraných dotazů a připomínek. Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle dizertační práce tak byly splněny. Práce přináší nové poznatky a je přínosná jak pro vlastní pochopení studovaných jevů, tak pro potenciální další využití. Získané výsledky tak, dle mého názoru, přispěly a přispějí k rozvoji daného oboru. **Závěrem mohu prohlásit, že předložená dizertační práce splňuje dle mého názoru všechny 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

V Praze dne 27. října 2023

prof. Ing. Ivan Richter, Dr.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra fyzikální elektroniky
Břehová 7, 115 19 Praha 1
E-mail: ivan.richter@fjfi.cvut.cz

Oponentní posudek disertační práce

Uchazeč: Ing. Marek Mach

Název disertační práce: Vývoj metod měření prostorového rozložení indexu lomu pomocí on-chip tomografie

Oponent: Ing. Marek Škerek, Ph.D.

Úvod, aktuálnost tématu a zhodnocení významu práce

Předložená disertační práce Ing. Marka Macha je zaměřena na metody měření prostorového rozložení indexu lomu s využitím digitální holografické interferometrie a výpočetní tomografie a to zejména v uspořádání typu on-chip. Digitální holografická interferometrie dnes představuje důležitou metrologickou techniku pro zkoumání topografie povrchů a objemových vlastností materiálů v širokém spektru aplikací. Technologický pokrok v oblasti výpočetní techniky a snímačů pro záznam obrazu umožňuje neustále posouvat možnosti využití těchto technik a rozšiřovat je do oblasti dynamických systémů, biologických aplikací a dalších. Vývoj nových přístupů a měřicích systémů, který je předmětem předložené disertační práce, je proto klíčový pro budoucí širší využití technik holografické interferometrie. Zejména zavádění kompaktních experimentálních sestav a redukce počtu komplexních komponent (např. lensless uspořádání diskutované v práci) vytváří potenciál pro masovější uplatnění těchto technik v celé řadě aplikací. Z tohoto úhlu pohledu je předložená disertační práce vysoce aktuální a nabízí zajímavé řešení některých současných problémů v daném oboru.

Postup řešení, použité metody a dosažení stanovených cílů

Postup práce na zadaném tématu byl logický a systematicky vedl k řešení stanovených problémů. Konstrukce interferometru Mach-Zehnderova typu v zobrazovacím režimu umožnila prozkoumat možnosti experimentální sestavy, odladit rekonstrukční algoritmy a stanovit referenční výstupy pro další sestavy navržené a testované v rámci práce. Rovněž volba testovacích vzorků byla systematická a jejich využití ve všech experimentech umožnilo relevantní srovnání jednotlivých technik. V případě nejpokročilejší konfigurace typu on-chip oceňuji schopnost vlastní přípravy vlnovodného prvku s navazovacím a vyvazovacím difrakčním členem, který umožňuje podstatné zkompaktnění systému a zejména umístění vzorku do těsné blízkosti detektoru. V úvodní části práce jsou popsány základní principy holografické interferometrie a výpočetní tomografie a jsou zmíněné softwarové nástroje pro jejich praktickou implementaci. Na základě informací uvedených v textu předpokládám, že se jedná o existující dostupné nástroje, které nebyly v rámci samotné práce rozvíjeny, nicméně

bych na některých místech ocenil jejich bližší představení, které by umožnilo lépe pochopit komplexnost procesu měření a zpracování dat.

Domnívám se, že stanovené cíle disertační práce, které byly formulovány v kapitole 4, byly naplněny. Byly vyvinuty a experimentálně demonstrovány metody pro vizualizaci prostorového rozložení indexu lomu v transparentních materiálech s důrazem na vysoké rozlišení a přesnost měření. Celkem byly realizovány a experimentálně prověřeny tři konfigurace: sestava pro digitální holografickou interferometrii v Mach-Zehnderově uspořádání (označováno MZDHI, viz kapitola 5.4), sestava pro digitální holografickou interferometrii ve Fizeauově uspořádání (označováno FDHI, viz kapitola 5.5) a sestava pro digitální holografickou interferometrii v Mach-Zehnderově uspořádání typu on-chip s optickým vlnovodem (označováno MZDHI-on-chip, viz kapitola 5.7). Ve všech případech byla funkčnost demonstrována na vybraných vzorcích, v případě konfigurací MZDHI a MZDHI-on-chip byla provedena také tomografická rekonstrukce prostorového rozložení indexu lomu. Jednotlivé konfigurace a jejich vlastnosti byly v závěru práce zhodnoceny a porovnány s komerčními systémy.

Stanovisko k výsledkům práce a původnímu přínosu autora

Za nejdůležitější výsledek práce považuji (stejně jako její autor) sestavení měřicí sestavy pro digitální holografickou interferometrii v Mach-Zehnderově uspořádání bez zobrazovacího objektivu v režimu on-chip, její experimentální otestování na řadě vzorků a srovnání s jinými přístupy včetně komerčních řešení. Navržené řešení představuje perspektivní cestu k širšímu využití digitální holografické interferometrie a tomografie v praktických aplikacích a také k větší kompaktnosti a robustnosti. Jedná se o původní řešení, které může být v budoucnu dále významně rozvíjeno. Domnívám se, že by pro práci bylo přínosné, kdyby některá další vylepšení, která autor v textu opakovaně zmiňuje, byla do práce již začleněna. Například zlepšení kvality vyvazovací mřížky může podstatně zlepšit parametry zařízení a jak bylo naznačeno, byly v tomto směru již realizovány další kroky.

Systematická a formální úprava

Práce obsahuje celkem 107 stran a je členěna do šesti kapitol. První část práce (kapitoly 2-4) je věnována rekapitulaci současného stavu poznání, definici důležitých pojmů a formulaci samotných cílů disertační práce. Jádro práce představuje kapitola 5, která obsahuje popis použitých postupů, vytvořených experimentálních uspořádání a výsledků provedených měření. Kapitola 6 je věnována zhodnocení výsledků a vyvození závěrů práce. Text práce je doprovázen řadou obrázků, schémat a fotografií dokumentujících experimentální výsledky, které významně přispívají k pochopení prezentované problematiky a výsledků práce. Kvalita obrázků je na dobré úrovni podobně jako celková úprava textu. Mám jenom drobnou

připomínku k překlepům a formulačním chybám, které pravděpodobně vznikly při postupných úpravách textu a vyskytují se v práci poměrně často v průběhu celého textu. K ještě lepší čitelnosti by rovněž přispělo odstranění některých nedostatků v sazbě textu, které se v práci místy vyskytují.

Vyjádření k publikacím uchazeče

Uchazeč publikoval během doktorského studia v odborné literatuře celkem 11 publikací, z toho 4 týkající se tematiky disertační práce. Z těchto prací považuji za nejdůležitější článek v časopise Optics Express věnovaný přímo problematice on-chip holografické interferometrie, který obsahuje všechny důležité informace uvedené také v textu práce v částech věnovaných on-chip Mach-Zehnderově sestavě a článek v časopise Applied Optics věnovaný interferometrii ve Fizeauově uspořádání. Kromě publikací týkajících se tématu práce publikoval uchazeč dalších 7 článků (u tří z nich byl hlavním autorem) věnovaných jiným tématům z oblasti interferometrických technik. Celkově považuji publikační aktivitu uchazeče za odpovídající.

Dotazy oponenta

K předložené práci mám několik drobných dotazů, které by mohl uchazeč v rámci obhajoby práce zodpovědět:

1. Na stránce 71 dole je zmíněna maximální teoretická difrakční účinnost zhotovené vyvazovací fázové mřížky v prvním řádu 6,25%. Můžete prosím přiblížit, jak jste k této hodnotě dospěl?
2. V závěru práce zmiňujete experimenty s komerční vyvazovací mřížkou, která měla vyšší kvalitu a umožnila dosažení lepších výsledků, mohl byste prosím blíže kvantifikovat její parametry a dosažené výsledky? Dokážete říct, jak by měla vypadat ideální vyvazovací mřížka pro vaší experimentální sestavu?

Závěr a doporučení k obhajobě

Na základě uvedeného se domnívám, že předložená práce splňuje podmínky standardně kladené na disertační práci, doktorand prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce a **doporučuji** práci k obhajobě.

V Praze dne 25. 10. 2023

