

**České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering**

Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D.

**Hodnocení kvality optických prvků a soustav
Assessment of Quality of Optical Elements and Systems**

Summary

The lecture discusses principles of selected methods of assessment of the quality of optical elements and systems in industrial practice, which were proposed, published and practically realized by the author and his co-workers in the last ten years. Firstly, fundamental requirements on the quality of optical elements and systems are presented shortly and quantitative characteristics for the assessment of the image quality of fabricated optical systems and the quality of optical surfaces are described. The basic characteristic of every optical system, which affects primarily the image quality of optical systems, is the wave aberration. Thus, the measurement of the wave aberration of the optical system is used frequently in practice for the quantitative evaluation of the image quality of fabricated optical systems and elements. The wave aberration affects significantly other measurable characteristics of the image quality as the point spread function, optical transfer function, and modulation transfer function. The fundamental characteristic for the assessment of the quality of optical surfaces is then the deviation of the measured surface from the nominal or optimal surface shape. Furthermore, different methods of quality assessment, which can be used in optical industry, are shortly mentioned. The main part of this text is focused on the presentation of author's work in this field and selected publications in peer-reviewed journals. Technical realizations of functional samples or prototypes of measuring devices are shown, which were developed in author's laboratory and some of them were also implemented in the production control in the Meopta-optika company. The design of the functional sample of the phase-shifting interferometer is shown, which is based on the Twyman-Green principle. Original proposed and published phase-shifting algorithms were used for the evaluation of interferometric measurements. Moreover, the principle of the functional sample of the shearing polarization interferometer is described, which serves for the assessment of the image quality of microscope objective lenses and for which an original phase evaluation technique was proposed and published. Another method, which is developed for a long time by the author and his co-workers, is the wavefront sensing using Shack-Hartmann sensor. Measuring systems with these sensors were implemented successfully in the production control in the Meopta-optika company. This lecture also deals with the method of measurement 3D shape of aspheric surfaces using the scanning principles and a new method proposed for the 3D shape reconstruction from deflectometric data. Finally, the field of active and adaptive optics elements is shortly mentioned, which is a very perspective research area for the future imaging and measuring optical systems.

Souhrn

Přednáška pojednává o vybraných metodách hodnocení kvality optických prvků a optických soustav v průmyslové výrobě, které byly autorem a jeho spolupracovníky navrženy, publikovány a realizovány v minulých deseti letech. Nejprve jsou stručně prezentovány základní požadavky na kvalitu optických prvků a soustav a jsou popsány kvantitativní charakteristiky hodnocení kvality zobrazení optických soustav a kvality vyráběných optických ploch. Základní charakteristikou každé optické soustavy, který ovlivňuje (degraduje) primárním způsobem kvalitu optických soustav je vlnová aberace optické soustavy, proto se často v praxi využívá měření vlnové aberace pro kvantitativní posouzení kvality zobrazení vyráběných optických soustav a prvků. Vlnová aberace následně ovlivňuje zásadním způsobem další měřitelné charakteristiky kvality zobrazení jako je rozptylová funkce bodu, optická funkce přenosu resp. funkce přenosu kontrastu. U vyráběných optických ploch je pak základní charakteristikou kvality odchylka měřené plochy od nominálního nebo optimálního tvaru plochy. Dále jsou prezentovány jednotlivé metody, jež se dají použít pro kvantitativní i kvalitativní hodnocení kvality vyráběných optických prvků a soustav. Stěžejní část textu je zaměřena na stručné představení autorovy práce v dané oblasti, přičemž jsou uvedeny vybrané publikace autora v impaktovaných časopisech a provedené realizace funkčních vzorků a prototypů měřicích zařízení, které vznikly na pracovišti autora a z nichž některé jsou implementovány do výrobní kontroly jednoho z největších evropských výrobců optiky, fy.Meopta-optika, s.r.o. Je zde prezentována vyvinutá konstrukce funkčního vzorku kompaktního fázového interferometru, pracujícího na bázi Twyman-Greenova schematu, kde jsou využity originální vyhodnocovací algoritmy pro metodu fázového posuvu, publikované autorem. Dále je popsán princip funkčního vzorku stříhového polarizačního interferometru pro vyhodnocování kvality zobrazení mikroskopových objektivů, pro něž byla navržena originální vyhodnocovací metoda. Jinou metodou, která je dlouhodobě na pracovišti autora zkoumána a vyvíjena je metoda Shack-Hartmannova senzoru, kde jsou měřicí systémy úspěšně implementovány ve výrobní kontrole v Meopta-optika, s.r.o. V přednášce je též popsána metoda měření asférických ploch pomocí skenovacího principu a nově navržená metoda pro rekonstrukci 3D povrchu pomocí deflektometrických měření. V neposlední řadě je stručně zmíněna oblast výzkumu aplikací aktivní a adaptivní optiky, kterou se autor a jeho spolupracovníci intenzivně zabývají a která je velmi perspektivní pro budoucí optické zobrazovací i měřicí systémy.

Klíčová slova:

Optická metrologie, optické soustavy, hodnocení kvality zobrazení, aberace, rozptylová funkce bodu, Strehlova definice, optická funkce přenosu, funkce přenosu kontrastu, topografie ploch, interferometrie, senzor vlnoplochy, deflektometrie, výrobní kontrola.

Keywords:

Optical metrology, optical systems, image quality assessment, aberrations, point spread function, Strehl definition, optical transfer function, modulation transfer function, surface topography, interferometry, wavefront sensor, deflectometry, production inspection.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Hodnocení kvality optických prvků a soustav

Autor: Doc.Ing.Jiří Novák, Ph.D.

Počet stran:

Náklad: výtisků

© Jiří Novák, ISBN:

Obsah

Summary	2
Souhrn	3
Klíčová slova	4
Obsah	5
1. Úvod	6
2. Základní požadavky na kvalitu optických prvků a soustav	7
3. Charakteristiky hodnocení kvality optických prvků a soustav	8
3.1 Charakteristiky hodnocení kvality zobrazení	8
3.1.1. Aberace optických soustav	8
3.1.2. Charakteristiky kvality zobrazení	11
3.2 Charakteristiky hodnocení kvality optických ploch	16
4. Metody hodnocení kvality optických soustav a optických ploch	17
4.1. Metody klasické dvousvazkové interferometrie	19
4.2. Vyhodnocování deformace vlnoplochy pomocí stříhové interferometrie	21
4.3. Hodnocení kvality optických soustav pomocí senzoru vlnoplochy	24
4.4. Měření a analýza chromatickým konfokálním senzorem	26
4.5. Deflektometrická metoda rekonstrukce 3D povrchu	28
4.6. Analýza a aplikace prvků aktivní a adaptivní optiky	29
5. Závěr	30
Literatura	31
Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D.	35

1. Úvod

Výroba optických prvků a soustav je velmi významnou součástí celosvětového průmyslu a v posledních letech optické technologie prodělávají velký rozvoj, kdy se stále více objevují v různých odvětvích vědy, techniky a biomedicíny, přičemž se klade důraz na jejich stále se zlepšující parametry. Optické prvky a soustavy se používají nejenom pro nejčastější zobrazovací aplikace (např. mikroskopy, dalekohledy, fotografické objektivy, atd.), ale i pro měřicí účely, komunikační či osvětlovací systémy [1]. Optickými prvky mohou být jak klasické čočky, hranoly, děliče světla, polarizační a fázové prvky, tak i speciální difraktivní prvky, aktivní optické prvky, aj. Optickou soustavou se poté rozumí systém definovaně uspořádaných optických prvků. Úkolem optických soustav je definovaným způsobem transformovat vlnové pole procházející optickou soustavou. Nejčastějším účelem vyráběných optických soustav je optické zobrazování, kdy optická soustava vytváří skutečný nebo virtuální obraz předmětu [2]. Proces transformace a detekce vlnového pole nazýváme optickým zobrazením. Předpokládejme, že předmět je popsán funkcí $s(\xi, \eta)$ a jeho obraz, vytvořený optickou soustavou je popsán funkcí $f(x, y)$. Zobrazením (zobrazovacím procesem) budeme nazývat transformaci předmětu $s(\xi, \eta)$ na jeho obraz $f(x, y)$ pomocí operátoru $\mathbf{L}$, který charakterizuje zobrazovací proces, tj. optickou soustavu a prostředí, ve kterém se optická soustava, předmět a obraz nacházejí. Lze tedy psát, že $f(x, y) = \mathbf{L}s(\xi, \eta)$. Struktura operátoru $\mathbf{L}$ může být velmi složitá a operátor $\mathbf{L}$ může být tvořen řadou dílčích operátorů, které se podílejí na různých částech zobrazovacího procesu. Obraz předmětu vytvořený reálnou optickou soustavou je vždy více či méně odlišný od obrazu předmětu vytvořeného ideální optickou soustavou a to z příčin jak fyzikálních (aberace optických soustav, difrakce a polarizace světla apod.), tak i technologických (nedokonalost výroby jednotlivých prvků optické soustavy, vady materiálů, ze kterých jsou tyto prvky vyrobeny, nedokonalá montáž a justáž optických soustav, apod.) [2]. K další degradaci obrazu dochází i při jeho detekci detektorem záření z důvodů nestability charakteristik detektoru, jeho šumu a vlivem nehomogenity, anizotropie prostředí a nestability termodynamických parametrů prostředí. Tyto procesy a také poloha předmětu se mohou měnit s časem. Z hlediska kvality optického prvku či optické soustavy nás tedy především zajímají fyzikální a technologické příčiny degradace obrazu a kvalitu těchto prvků či soustav posuzujeme podle kritérií charakterizující tyto faktory.

2. Základní požadavky na kvalitu optických prvků a soustav

V optické výrobě patří k základním úkolům kontroly výroby v různých částech výrobního procesu (vstupní kontrola, kontrola kvality v procesu výroby a justáže, výstupní kontrola) hodnocení kvality zobrazení vyráběných optických soustav a kontrola geometrických parametrů optických prvků a soustav. Tato kvalita úzce souvisí s jejich fyzikálními a geometrickými parametry. Každý optický prvek vyráběné optické soustavy má při návrhu předepsáno, s jakou tolerancí má být vyroben. Výslednou kvalitu zobrazení ovlivňují dané fyzikální zákonitosti (např. difrakce světla), kvalita jednotlivých částí těchto soustav (tvar povrchu optických prvků, vlastnosti materiálu, apod.) a vzájemná kombinace těchto částí do jednoho celku s požadovanými optickými vlastnostmi (např. ohnisková vzdálenost, centricita, apod.). Úkolem kontroly [3-7], ať již v průběhu, na vstupu nebo na konci výrobního procesu, je zjistit, zda vyrobená optická soustava reálně splňuje požadavky na ni kladené. Požadavky na vlastnosti optické soustavy závisí na účelu, kterému má daná optická soustava sloužit. V případě zobrazovacího účelu budeme od optické soustavy vyžadovat, aby poskytovala vysokou kvalitu zobrazení a splňovala další požadavky na základní parametry (zvětšení, zorné pole, apod.). U měřicích optických soustav zase požadujeme, aby jejich optické soustavy poskytovaly vysokou přesnost měření, byly odolné proti vnějším poruchám a vlivům. Jiným požadavkem na optické soustavy je, aby byly co nejsnáze vyrobitelné, jejich justáž nebyla příliš složitá a tedy výrobní cena byla co nejnižší. Na kvalitu zobrazení optických soustav a na jejich další charakteristiky mají vliv zejména odchylky hodnot indexu lomu od předpokládaných hodnot (nehomogenita indexu lomu, dvojlom, šlíry, bubliny, apod.), výrobní chyby optických prvků (odchylky tvaru ploch od jejich nominálního tvaru, decentrace optických prvků, klínovitost planoparalelních desek, nedodržení úhlů hranolů, apod.) a chyby justáže, které vedou k narušení vzájemné polohy jednotlivých prvků optické soustavy, což má za důsledek rozostření obrazu, jeho dvojení, apod. Některé výrobní a justážní chyby optických prvků a podsoustav mají vliv na stejnou charakteristiku optické soustavy jako např. na ohniskovou vzdálenost, kvalitu zobrazení apod.

Základními úlohami výrobní kontroly je měření odchylek geometrických parametrů optických prvků, zejména pak tvaru optických ploch a charakteristických rozměrů optických prvků. Z technologických důvodů nelze tyto prvky vyrobit zcela přesně a proto je velmi důležité umět určit odchylky jednotlivých parametrů těchto optických prvků. Tyto odchylky musí být menší nežli stanovené výrobní tolerance, které zajišťují, aby nedošlo k viditelnému

snížení parametrů optické soustavy z těchto prvků složené. Velikost tolerancí závisí na volbě kritéria, které je zvoleno pro posouzení kvality zobrazení nebo parametrů vyšetřované optické soustavy. Vzhledem k vysoké přesnosti optické výroby, která se u geometrického tvaru povrchů vyráběných optických prvků pohybuje v řádu desítek nanometrů, a stále se zvyšujícím požadavkům na výstupní kvalitu, se nutně zvyšují požadavky na kontrolu kvality optické výroby ve výrobním procesu. Z hlediska tohoto celosvětového vývoje je tedy kladen stále větší důraz na kontrolní metody, které se využívají v optické průmyslové výrobě [3-7]. Tento text stručně shrnuje originální práce autora [8-47], týkající se jak teoretické tak praktické problematiky vybraných metod.

3. Charakteristiky hodnocení kvality optických prvků a soustav

Základní metody hodnocení kvality optických prvků a soustav, kterými se budeme v této práci zabývat, lze rozdělit do dvou skupin: hodnocení kvality zobrazení a hodnocení tvaru ploch optických prvků.

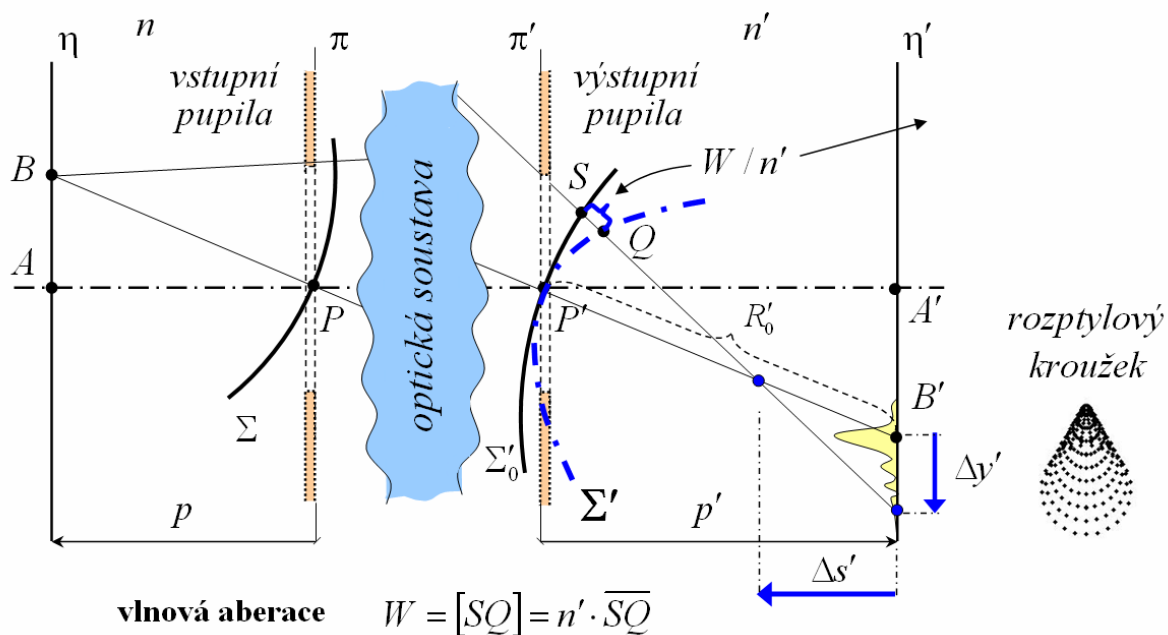
3.1. Charakteristiky hodnocení kvality zobrazení

Tyto požadavky jsou obvykle kvantitativně vyjádřeny pomocí fyzikálních charakteristik optické soustavy, jako je např. deformace vlnoplochy vystupující z měřené optické soustavy, rozptylová funkce bodu (PSF), funkce přenosu kontrastu (MTF), Strehlova definice nebo jiné kvantitativní a kvalitativní charakteristiky hodnocení optických soustav [2-7, 48-55].

3.1.1. Aberace optických soustav

Zcela zásadním faktorem, který ovlivňuje ve většině praktických případů kvalitu zobrazení vyráběných optických soustav a prvků, jsou aberace těchto soustav. Aberacemi (vadami) optických soustav nazýváme odchylky zobrazení reálné optické soustavy od ideální optické soustavy [2]. Aberace optických soustav vznikají z několika příčin a to v důsledku lomu a odrazu světla na plochách optické soustavy, nedokonalostí výroby optických soustav a vadami materiálu, ze kterého jsou optické prvky vyráběny. Budeme-li popisovat proces optického zobrazení pomocí aproximace geometrické optiky, poté při zobrazení reálné optické soustavy s aberacemi nebude obrazem bodu bod, jak je tomu u ideálního zobrazení, nýbrž rozptylový kroužek. Na obr.1 je znázorněno zobrazení takovouto soustavou. Uvažujme mimosový bod B, z kterého vychází sférická vlnoplocha Σ . Po průchodu optickou soustavou se tato vlnoplocha transformuje na vlnoplochu Σ' obecného tvaru. Odchylku W vlnoplochy Σ' od

ideální sférické vlnoplochy Σ_0' , na kterou by se transformovala v případě ideální soustavy, nazýváme vlnovou aberací optické soustavy. Změna vlnové aberace se změnou vlnové délky světla se poté nazývá chromatická aberace (barevná vada). Paprsky vycházející z bodu B, se po průchodu optickou soustavou neprotínají v jednom bodě, ale obrazovou rovinu η' protnou v řadě různých bodů tvořících tzv. rozptylový kroužek. Čím větší bude vlnová aberace optické soustavy, tím větší bude velikost δ rozptylového kroužku.



Obr. 1: Zobrazení reálnou optickou soustavou (geometrická teorie)

Poloha obrazové roviny η' se volí tak, aby procházela bodem A' , který je ideálním obrazem osového bodu A. Vlnová aberace je základní měřitelnou charakteristikou optické soustavy, která primárním způsobem ovlivňuje (degraduje) kvalitu zobrazení. Pokud má být zobrazení optickou soustavou co nejdokonalější, musí být vlnová aberace korigována, tak aby její zbytková hodnota byla co nejmenší a to v co nejširší spektrální oblasti. Tzv. Rayleighovo kritérium umožňuje přibližně hodnotit kvalitu zobrazení. Je-li zbytková vlnová aberace W optické soustavy, pro všechny body předmětu, menší než čtvrtina vlnové délky světla λ , tj. $W < \lambda/4$, potom se zobrazení reálné optické soustavy prakticky neliší od zobrazení ideální optické soustavy pro tuto vlnovou délku světla.

Vlnová aberace optické soustavy se obvykle vyjadřuje ve tvaru mocninné řady (tzv. Seidlový polynom), platí

$$W(r, \varphi) = \sum_{k,l,m} W_{klm} y^k r^l \cos^m \varphi, \quad (1)$$

kde W_{klm} jsou aberační koeficienty, r a φ jsou polární souřadnice bodu na referenční sféře optické soustavy, y je velikost předmětu a dále pak: $l \geq m$, $l+m$ – sudé číslo a $p = l + m - 1$ nám udává řád aberace (vzhledem k numerické apertuře optické soustavy). Jiným často využívaným způsobem je vyjádření vlnové aberace pomocí ortogonálních polynomů [48-50]. O aplikaci aberačních polynomů pro vyjádření vlnové aberace a její korekci pojednávají práce autora [8,9]. Pro případ kruhové pupily se využívají tzv. Zernikeovy polynomy

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = N_n^m R_n^m(\rho) \Theta_m(\varphi), \quad (2)$$

kde $\Theta_m(\varphi) = \cos(|m|\varphi)$ pro $m \geq 0$, $\Theta_m(\varphi) = \sin(|m|\varphi)$ pro $m < 0$, a

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [0.5(n+|m|)-s]! [0.5(n-|m|)-s]!} \rho^{n-2s}, \quad (3)$$

pro $n \geq 0$, $|m| \in \langle 0, n \rangle$ a $n - |m|$ sudé. Použijeme-li normované polární souřadnice ($\rho = r/R, \varphi$), potom můžeme vlnovou aberaci $W(\rho, \varphi)$ definovanou na kruhové oblasti o poloměru R vyjádřit ve tvaru

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} Z_n^m(\rho, \varphi). \quad (4)$$

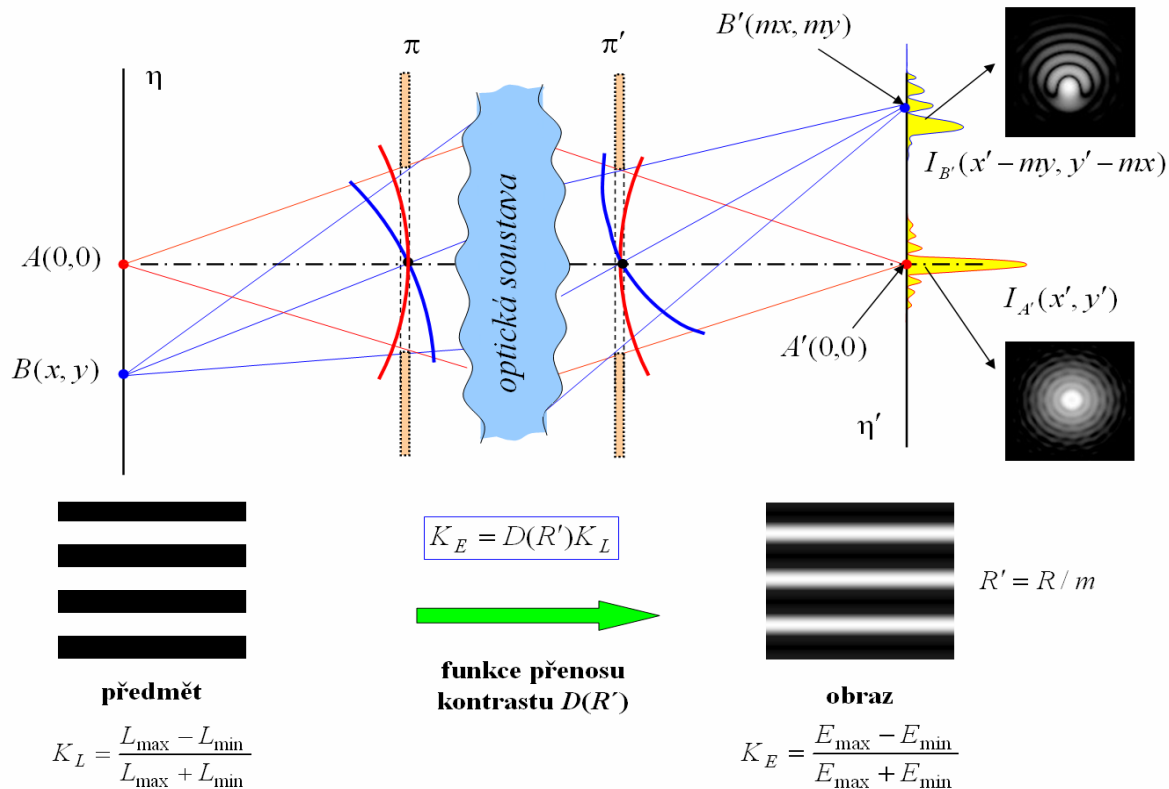
O efektivní aplikaci ortogonálních polynomů pro vyjádření vlnové aberace pojednává práce autora [10]. Speciální případ aproximace vlnové aberace (resp. tvaru vlnoplochy) pomocí racionálních lomených funkcí byl autorem publikován v práci [11], tj.

$$W(x, y) = \frac{P(x, y)}{Q(x, y)} = \sum_{i=0}^M a_i g_i(x, y) \bigg/ \sum_{j=0}^N b_j g_j(x, y), \quad (5)$$

kde jako funkce $g_i(x, y)$ jsou často voleny polynomy (monomy či Čebyševovy polynomy), a_i, b_j jsou koeficienty aproximace vlnové aberace a x, y jsou souřadnice v rovině, v níž je vlnová aberace vyšetřována. Kritéria hodnocení a analýza kvality zobrazení optických prvků s rovinnými prvky byla rozebrána v pracích autora [12,13].

3.1.2. Charakteristiky kvality zobrazení

Pokud budeme při popisu optického zobrazení uvažovat vlnovou povahu světla, poté v důsledku konečných rozměrů optických soustav, dochází při zobrazení k difrakci světla a obrazem bodu není bod, ale difrakční obrazec, vyznačující se určitým rozdělením energie. Rozdělení energie v difrakčním obrazci závisí na vlnové délce světla, tvaru pupily, numerické apertuře, míře koherence světla, propustnosti optické soustavy, poloze zobrazovaného bodu v rovině předmětu, vzdálenosti předmětu od optické soustavy a aberacích optické soustavy. Optická soustava, jejíž vlastnosti jsou omezeny pouze vlnovou povahou světla (soustava bez aberací), se nazývá fyzikálně dokonalou optickou soustavou. V důsledku vlnové povahy světla nebudou obrazem bodů A a B body A' a B', ale jejich difrakční obrazce, vyznačující se určitým rozdělením intenzity světla I_A a I_B v obrazové rovině, jak je znázorněno na obr. 2. Tato odezva optické soustavy na bodový signál (bodový zdroj světla) se nazývá rozptylová funkce bodu (angl. PSF – Point Spread Function) [2,48-51]. Tvar rozptylové funkce (rozdělení energie v difrakčním obrazci) závisí na poloze zobrazovaného bodu v rovině předmětu. Je-li rozptylová funkce bodu optické soustavy stejná pro všechny body předmětu, potom takovou optickou soustavu nazýváme isoplanatickou optickou soustavou.



Obr. 2: Rozptylová funkce bodu a přenosová funkce kontrastu

Proces zobrazení optickou soustavou můžeme popsat v případě nekoherentního kvasimonochromatického záření vztahem [2]

$$I(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O(P)D(Q,P)dP, \quad (6)$$

kde $I(Q)$ je rozdělení intenzity v obrazové rovině (obraz), $O(P)$ je rozdělení intenzity v obrazové rovině, které je geometricko-optickým obrazem rozdělení intenzity v předmětové rovině (předmět) a $D(Q,P)$ je nekoherentní rozptylová funkce bodu (PSF) optické soustavy, tj. rozdělení intenzity světla v obraze bodu, Q je libovolný bod v obrazové rovině a P je bod v obrazové rovině, který je geometricko-optickým obrazem libovolného bodu v rovině předmětu. V případě optických soustav majících malé zbytkové aberace (isoplanatické soustavy), je rozptylová funkce bodu invariantní vzhledem k posunu, tj. platí $D(Q,P) = D(Q-P)$ a fyzikálně to znamená, že rozptylová funkce bodu optické soustavy je stejná pro všechny body obrazové roviny. Vzhledem k tomu, že rozptylová funkce bodu optické soustavy velmi rychle klesá již pro malé hodnoty $Q - P$, stačí, aby byla stejná jen pro body nacházející se v blízké oblasti kolem bodu Q (isoplanatická oblast). Rozptylovou funkcí bodu reálné optické soustavy můžeme získat buď přímo od výrobce dané optické soustavy, nebo si ji můžeme vypočítat, pokud známe konstrukční parametry optické soustavy a nebo ji můžeme získat měřením. V případě zobrazení koherentním zářením platí obdobně [2]

$$U(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(P)K(Q,P)dP, \quad (7)$$

kde $U(Q)$ je rozdělení amplitudy v obrazové rovině (obraz), $U_0(P)$ je rozdělení amplitudy v obrazové rovině, které je geometricko-optickým obrazem rozdělení amplitudy v předmětové rovině (předmět) a $K(Q,P)$ je koherentní rozptylová funkce bodu optické soustavy, tj. rozdělení amplitudy světla v obraze bodu. V případě isoplanatické optické soustavy platí $K(Q,P) = K(Q-P)$. Mezi nekoherentní rozptylovou funkcí bodu $D(Q,P)$ a koherentní rozptylovou funkcí bodu $K(Q,P)$ platí, že $D(Q,P) = |K(Q,P)|^2$. Předpokládejme, že výslednou rozptylovou funkcí $D(Q,P)$ si můžeme rozdělit na část $D_0(Q,P)$, představující rozptylovou funkce fyzikálně dokonalé optické

soustavy bez aberací, a část $D_A(Q, P)$, vyjadřující vliv aberací na rozptylovou funkci reálné optické soustavy. Pro intenzitu v obrazové rovině lze psát

$$I(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O(P) D_0(Q, P) dP + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O(P) D_A(Q, P) dP. \quad (8)$$

Pro rozdělení intenzity světla v obrazu bodového zdroje (rozptylová funkce bodu – PSF) v bodě P obrazové roviny optické soustavy platí [2]

$$I(P) = KU(P)U^*(P) = K|U(P)|^2, \quad (9)$$

kde K je konstanta, $U(P)$ je amplituda pole v obrazové rovině, pro kterou na základě skalární difrakční teorie zobrazení velmi dobře platí

$$U(P) \approx -\frac{i}{\lambda R'^2} \iint_{S'} U_0(M) \exp[ikW(M)] \exp[ik(r_{PM} - R')] dS', \quad (10)$$

kde $U_0(M)$ je amplitudová propustnost optické soustavy (nenulová jen v té části výstupní pupily, kterou prochází světlo), $W(M)$ je vlnová aberace optické soustavy, R' je poloměr křivosti referenční sféry S' , $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo v obrazovém prostoru, λ je vlnová délka světla v obrazovém prostoru a r_{PM} je vzdálenost bodu P obrazové roviny od bodu M na výstupní referenční sféře procházející středem výstupní pupily. V případě zobrazení nekoherentním zářením fyzikálně dokonalou ($W(M) = 0$) rotačně symetrickou optickou soustavou s rovnoměrně osvětlenou a propustnou ($U_0(M) = 1$) kruhovou pupilou jsou rozptylová funkce bodu $I(r)$ a průměr d_A centrální části difrakčního obrazce (tzv. Airyho disk) dány následujícími vztahy

$$I(r) = I_0 [2J_1(a)/a]^2, \quad d_A = 2.44\lambda c, \quad (11)$$

kde I_0 označuje intenzitu světla ve středu difrakčního obrazce, $J_1(a)$ Besselovu funkci prvního druhu a řádu jedna argumentu $a = \pi r/\lambda c$, λ vlnovou délku světla, $c = 1/2NA$ clonové číslo optické soustavy, kde NA je numerická apertura optické soustavy, a r vzdálenost místa, ve kterém určujeme intenzitu od středu difrakčního obrazce. V práci autora [14] byl teoreticky odvozen zobecněný analytický vztah PSF pro velké hodnoty numerické apertury, jehož aproximací pro malou hodnotu numerické apertury dostaneme vztah (11). Bylo

ukázáno, že při zvyšování numerické apertury optické soustavy dochází k zužování centrálního maxima rozptylové funkce. V práci [15] bylo poté využito nesymetrickosti PSF k analýze centricity optické soustavy. Pro reálnou optickou soustavu je tvar této ideální bodové odezvy deformován a v důsledku toho dochází ke snižování kvality zobrazení. Rozptylová funkce bodu tak často může být využita jako charakteristika hodnocení kvality zobrazení.

Další funkcí, která nám charakterizuje zobrazovací vlastnosti optické soustavy je optická funkce přenosu (**OTF - Optical Transfer Function**) [2,4,6, 47-49]. Optickou funkci přenosu $\tilde{D}(s,t)$ můžeme vypočítat jako Fourierovu transformaci rozptylové funkce $D(Q,P)$, kde veličiny s a t se nazývají prostorové frekvence. Její modul (**MTF - Modulation Transfer Function**, funkce přenosu kontrastu) nám udává, s jakým kontrastem bude předmět zobrazen, tj. s jakým kontrastem budou jednotlivé struktury předmětu, charakterizované prostorovou frekvencí R , udanou počtem čar na jednotku délky (např. čar/mm), optickou soustavou zobrazeny. Pro funkci přenosu kontrastu platí, že je poměrem kontrastu obrazu K_E a předmětu K_L . Optická soustava není schopna jednotlivé struktury předmětu zobrazit se stejným kontrastem a obraz bude tedy mít vždy horší kontrast než předmět, přitom hrubší struktury předmětu budou zobrazeny s větším kontrastem než jemné struktury. Velmi často se stává, že příliš jemné struktury předmětu nebudou optickou soustavou vůbec zobrazeny, neboť parametry optické soustavy to neumožňují. V případě zobrazení nekoherentním zářením je optická funkce přenosu fyzikálně dokonalé optické soustavy s rovnoměrně osvětlenou a propustnou kruhovou pupilou dána vztahem

$$D(s) = \frac{2}{\pi} \left(\arccos s - s \sqrt{1-s^2} \right), \quad (12)$$

kde $s = \lambda R c$, $s \in \langle 0,1 \rangle$ je normovaná prostorová frekvence, λ vlnová délka světla, R prostorová frekvence v obrazové rovině a c clonové číslo optické soustavy v obrazovém prostoru. Mezní prostorová frekvence $R_{\max}$, kterou je optická soustava schopna přenést s nulovým kontrastem, je dána vztahem $R_{\max} = 1/\lambda c = 2NA/\lambda$. Průběh OTF optické soustavy lze ovlivnit způsobem osvětlení vstupní pupily soustavy. U reálných optických soustav dochází vlivem aberací k významnému snižování hodnot kontrastu oproti fyzikálně dokonalé soustavě. Na základě hodnot funkce přenosu kontrastu pak lze kvantitativně hodnotit kvalitu zobrazení optických soustav. Jak již bylo řečeno, mají aberace optické soustavy podstatný vliv na kvalitu zobrazení. V důsledku

aberrací optické soustavy dojde k ovlivnění rozptylové funkce bodu, optické funkce přenosu a hloubky ostrosti optické soustavy.

V praxi nás však nejvíce zajímají zobrazovací optické soustavy s malými aberacemi, neboť snahou procesu optické konstrukce je navrhnout optické soustavy s co nejlepší kvalitou zobrazení. Za tohoto předpokladu můžeme jako kritérium kvality zobrazení optické soustavy použít tzv. Strehlovu definici, která je definována jako podíl maximální hodnoty rozptylové funkce bodu reálné optické soustavy zatížené vlnovou aberací $W(\rho, \varphi)$ a maximální hodnoty rozptylové funkce bodu fyzikálně dokonalé optické soustavy ($W = 0$). Pro Strehlovu definici potom platí [2, 47, 51-54].

$$S.D. = \frac{I_{\max}(W \neq 0)}{I_{\max}(W = 0)} = \left| \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[ikW(\rho, \varphi)] \rho d\rho d\varphi \right|^2 \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 E_0. \quad (13)$$

kde variance E_0 vlnové aberace je dána jako

$$E_0 = \overline{W^2} - \overline{W}^2, \quad \overline{W} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi, \quad \overline{W^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi.$$

Pro maximální hodnotu Strehlovu definice, které nabývá v tzv. optimální obrazové rovině, kde variance vlnové aberace je minimální. Potom platí

$$(S.D.)_{\max} \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 E_{0\min}, \quad (14)$$

kde za uvážení aberrací 3. a 5. řádu platí

$$E_{0\min} = \frac{W_{40}^2}{180} + \frac{W_{40}W_{60}}{60} + \frac{W_{40}W_{42}}{180} + \frac{W_{22}^2}{24} + \frac{W_{22}W_{42}}{16} + \frac{W_{31}^2}{72} + \frac{W_{31}W_{51}}{30} + \frac{W_{31}W_{33}}{48} + \\ + \frac{9W_{60}^2}{700} + \frac{W_{60}W_{42}}{120} + \frac{W_{51}^2}{48} + \frac{19W_{42}^2}{720} + \frac{W_{33}^2}{64} + \frac{W_{51}W_{33}}{40},$$

přičemž W_{kl} jsou aberační koeficienty. Nemá-li se obraz vytvořený optickou soustavou s aberacemi prakticky odlišovat od obrazu vytvořeného optickou soustavou bez aberrací (fyzikálně dokonalou optickou soustavou), potom musí být Strehlova definice $S.D. \geq 0.8$ (tzv. Strehlovo kritérium). Variance E_0 musí tedy splňovat podmínku $E_0 \leq (\lambda/14)^2$. Tento vztah lze pak např. využít při stanovení tolerancí na jednotlivé parametry optické soustavy. O vlivu vibrací na zobrazovací vlastnosti tenkého zrcadla bylo autorem pojednáno v [16].

Originální metoda analýzy vlivu závislosti chromatických aberací na kvalitu optické soustavy byla navržena v článku [17]. Vliv pozice předmětu na zobrazovací vlastnosti a přesnost optických měřicích soustav byla publikována v [18,19]. Analýza zobrazovací kvality brýlových čoček byla poté autorem analyzována v pracích [20-22].

3.2. Charakteristiky hodnocení kvality optických ploch

Pro hodnocení tvaru optických ploch se jako kritérium používá buď odchylka tvaru měřené plochy od optimální plochy (např. sférické nebo rovinné) nebo odchylka tvaru od nominálního tvaru plochy. Velikost odchylky δW se v optické praxi obvykle charakterizuje jako střední kvadratická odchylka (**RMS** – **Root-Mean-Square**) popř. jako rozdíl mezi největší kladnou a největší zápornou hodnotou odchylky δW (**PV** – **Peak-to-Valley**), tj.

$$RMS = \sqrt{\overline{\delta W^2} - \overline{\delta W}^2}, \quad PV = \max(\delta W) - \min(\delta W). \quad (15)$$

Tvar obecné optické asférické plochy lze dle normy ISO 10110-12 [56] popsat pomocí následující rovnice

$$z = \frac{C_X x^2 + C_Y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa_X)(xC_X)^2 - (1 + \kappa_Y)(yC_Y)^2}} + f(x, y), \quad (16)$$

kde $f(x, y) = A_4 x^4 + B_4 y^4 + A_6 x^6 + B_6 y^6 + \dots + A_3 |x|^3 + B_3 |y|^3 + \dots$, C_X, C_Y jsou vrcholové křivosti plochy v rovinách xz , yz a κ_X, κ_Y jsou parametry plochy. Pro vyjádření tvaru ploch lze využít i jiných typů funkcí, např. ortogonálních polynomů.

Povrch každé plochy optického prvku (např. čočky) je nutno vyrobit s maximální přesností, výrobní odchylky tvaru povrchu jsou vyžadovány s přesností zlomků vlnové délky světla (10^{-4} mm). Protože výrobně nejjednodušší jsou sférické plochy, dlouhou dobu se tyto plochy používaly v naprosté většině případů. Pomocí sférických ploch však nelze mimo speciálních případů dosáhnout dokonalého optického zobrazení a vždy zůstávají zbytkové aberace, které nepříznivě ovlivňují optické zobrazení. Redukce těchto zbytkových aberací na přijatelnou míru vede zvláště u náročných aplikací k velmi složitým konstrukcím s použitím velkého počtu sférických čoček. Z tohoto důvodu je snaha ve stále větší míře využívat čočky s asférickými povrchy, pomocí kterých se podstatně efektivněji dosáhne požadované kvality zobrazení.

4. Metody hodnocení kvality optických soustav a optických ploch

Bezkontaktní metody, které se v současné době používají pro analýzu kvality zobrazení optických soustav resp. měření tvaru optických ploch během výrobního procesu v optické výrobě, je možno podle principu rozdělit na interferometrické a neinterferometrické. Obě kategorie metod jsou v optické výrobě hojně využívány. Experimentální metody hodnocení kvality optických soustav a prvků, které umožňují objektivně vyhodnotit zobrazovací vlastnosti měřené optické soustavy nebo prvku již v průběhu výroby, lze v zásadě rozdělit na přímé metody (měření rozdělení PSF, MTF, OTF) a na nepřímé metody (měření deformace vlnoplochy).

Měření rozdělení intenzity v obrazové plošce je experimentální metodou měření rozptylové funkce bodu, kdy velmi malé dírky v testovací destičce reprezentují bodový předmět, ze kterého vychází kulová vlna. Je možno mít v testovací destičce řadu otvorů rozložených po celém zorném poli (velmi výhodné je pravidelné rozložení), což nám umožňuje kvalitativně i kvantitativně hodnotit kvalitu zobrazení v celém zorném poli naráz na základě měřené rozptylové funkce bodu [3,4]. Pro měření optické funkce přenosu (OTF) resp. funkce přenosu kontrastu (MTF) existuje několik experimentálních metod, které nejčastěji používají vyhodnocení intenzity obrazu vhodného testového obrazce (dírký, štěrbiny, kříže), který je zobrazován s pomocí testované optické soustavy.

Nepřímé metody umožňují kvantitativně určit deformaci vlnoplochy, ke které dochází při průchodu optickou soustavou či prvkem nebo odrazu od měřené plochy optického prvku. Na základě měření deformace vlnoplochy lze pak matematicky vypočítat optickou funkci přenosu, funkci přenosu kontrastu a další kvantitativní charakteristiky používané pro hodnocení kvality optických soustav a prvků. Zde se nabízí daleko širší možnosti oproti přímým metodám zjišťování těchto kvalitativních kritérií pro kontrolu optických soustav a prvků a existuje mnoho různých fyzikálních principů, jak deformaci vlnoplochy měřit. V principu můžeme rozdělit metody hodnocení kvality optických soustav a prvků, které využívají měření deformace vlnoplochy na metody interferometrické a neinterferometrické. Interferometrické metody [3-5,7,57], které jako princip využívají dvousvazkové nebo vícesvazkové interference kvazimonochromatického popř. polychromatického optického záření, jsou z hlediska vyhodnocení nejpřesnějším typem metod měření deformace vlnoplochy. Jistou nevýhodou těchto metod je však velmi vysoká cena komerčních zařízení, která tyto metody realizují v praxi, citlivost na mechanické vibrace, provádění měření často jen pro jednu vlnovou délku, a

také to, že doba potřebná k získání potřebných informací může být delší než je charakteristická doba vyšetřovaného procesu. Velkou nevýhodou těchto zařízení je jejich vysoká citlivost na vnější faktory, jako jsou např. vibrace a termodynamické parametry prostředí. Z interferometrických metod se dají využít též metody stříhové interferometrie [3,4]. Princip měření stříhové interferometrie spočívá v tom, že necháme interferovat vyšetřovanou vlnu s jednou nebo více prostorově modifikovanými replikami (kopiemi) stejné vlny. Výhodou metod stříhové interferometrie je značná necitlivost vůči nepříznivým vlivům při měření a to, že není potřeba generovat speciální referenční vlnu. Obdobně se dá využít metoda Linnikova interferometru [3].

Zcela odlišnou skupinou metod pro měření deformace vlnoplochy jsou neinterferometrické metody. Zde se uplatňují různé fyzikální měřicí přístupy, jež jsou založeny na určování gradientu nebo křivosti vlnoplochy popř. na zákonitostech šíření intenzity vlnového pole prostředím [3,4,7]. Nejčastěji se v optické průmyslové praxi v současnosti využívají gradientní metody na bázi Shack-Hartmannova resp. Hartmannova senzoru vlnoplochy, jež na základě nepřímého měření hodnot gradientu vlnoplochy matematicky rekonstruuji tvar měřené vlnoplochy. I když je přesnost a též prostorové rozlišení měření deformace vlnoplochy pomocí těchto metod o něco nižší nežli u interferometrických metod, jsou tyto metody vzhledem ke své jednoduchosti, robustnosti, možnosti měření dynamických změn, vysokému dynamickému rozsahu měření a nižší finanční náročnosti velmi oblíbené a v praxi využívané pro různé aplikace z oblasti kontroly kvality optických soustav a prvků.

Bezkontaktní metody kontroly a měření tvaru optických ploch jsou založeny nejčastěji na interferenci světla, na projekční resp. laserové skenovací deflektometrii či 3D skenovacích systémech s konfokálními nebo laserovými senzory vzdálenosti. Komerčně dostupné interferometry, nejčastěji buď Fizeauova nebo Twyman-Greenova typu, jejichž princip spočívá v tom, že necháme interferovat vyšetřovanou vlnoplochu s přesně definovanou referenční vlnoplochu, umožňují velice přesně měřit rovinné a sférické plochy. U asférických ploch je situace značně obtížnější, jelikož s klasickými interferometry je možno měřit asférické plochy jen s malou odchylkou od sférické plochy. Pro větší odchylky měřené asférické plochy od plochy sférické je nutno užít speciální adapter a difraktivní optický element, který je „navržen přímo na míru“ měřené asférické ploše a nelze jej použít pro měření jiné asférické plochy [4,5]. Jiným využívaným principem je „metoda sešívání“ subapertur (angl. subaperture stitching) [4,5]. Měření asférických ploch lze také realizovat pomocí tzv. „nulové optiky“ [4,5], což je speciálně navržený optický systém, který koriguje aberace paprskového svazku prošlého nebo odraženého

od měřené asférické plochy na paprskový svazek bez aberací a to nejčastěji rovnoběžný. Nevýhodou tohoto způsobu měření je to, že pro každou měřenou asférickou plochu musí být navržena a velmi přesně vyrobena příslušná „nulová optika“, což je časově náročné a finančně nákladné.

Pro měření asférických ploch lze principiálně použít i Hartmannův senzor a jeho modifikace [3,4,7]. Jeho nevýhodou je však to, že vzhledem ke své diskrétní struktuře měřicích apertur není schopen registrovat lokální jemná poškození a nedokonalosti tvaru povrchu. Stále více se začínají též uplatňovat metody optické projekční deflektometrie [4], především u tam, kde je požadována menší přesnost měření (např. při kontrole tvaru brýlových čoček), jelikož dosahují v současné době nejlepší přesnosti cca. 0.5 μm . Často se též využívá vysoce přesných 3D skenovacích systémů s konfokálními nebo laserovými interferometrickými senzory [4,5,58,59], jež provádějí bezkontaktní skenování měřeného povrchu na zadané síti měřicích bodů.

V následujícím textu bude stručně popsán přínos autora v rámci dané problematiky metod hodnocení kvality optických prvků a soustav s uvedením některých výsledků aplikací navržených metod.

4.1. Metody klasické dvousvazkové interferometrie

Klasické metody dvousvazkové interferometrie umožňují provádění vysoce přesných měření optického dráhového rozdílu (v řádu nm). Interferometrické měřicí metody [3-5,7, 57] jsou založeny na principu interference vyšetřovaného a referenčního vlnového pole a následné detekci prostorového rozdělení intenzity interferenčního pole. Úlohou vyhodnocovacích metod je správné určení fázového resp. dráhového rozdílu mezi interferujícími vlnami. Intenzitu interferenčního pole dvou lineárně polarizovaných vlnových polí v dvousvazkovém interferometru můžeme popsat pomocí vztahu

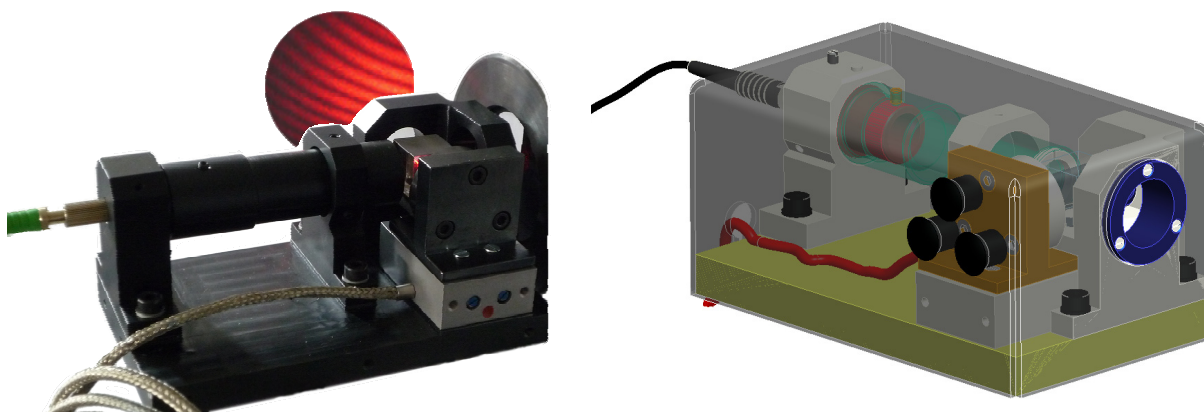
$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y)] = a(x, y) + b(x, y) \cos[kW(x, y)], \quad (17)$$

kde $a(x,y)$ je funkce charakterizující intenzitu pozadí, $b(x,y)$ je funkce určující modulaci interferenčního signálu, $\Delta\varphi(x,y)$ je fázový rozdíl interferujících svazků, k je vlnové číslo a $W(x,y)$ je dráhový rozdíl svazků. Velmi častou metodou vyhodnocení je metoda fázového posuvu (angl. phase shifting), která umožňuje získat dráhový resp. fázový rozdíl pomocí více měření intenzity $I_i(x,y)$ fázově modulovaného interferenčního pole

$$I_i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y) + \psi_i], \quad i = 1, \dots, N, \quad N \geq 3, \quad (18)$$

kde ψ_i je hodnota fázového posuvu. Z fázově posunutých interferogramů lze získat množství různých algoritmů pro výpočet fázového rozdílu při provedení N fázových posuvů. Samozřejmě vhodná volba hodnot fázového posuvu ovlivňuje přesnost jednotlivých vyhodnocovacích algoritmů.

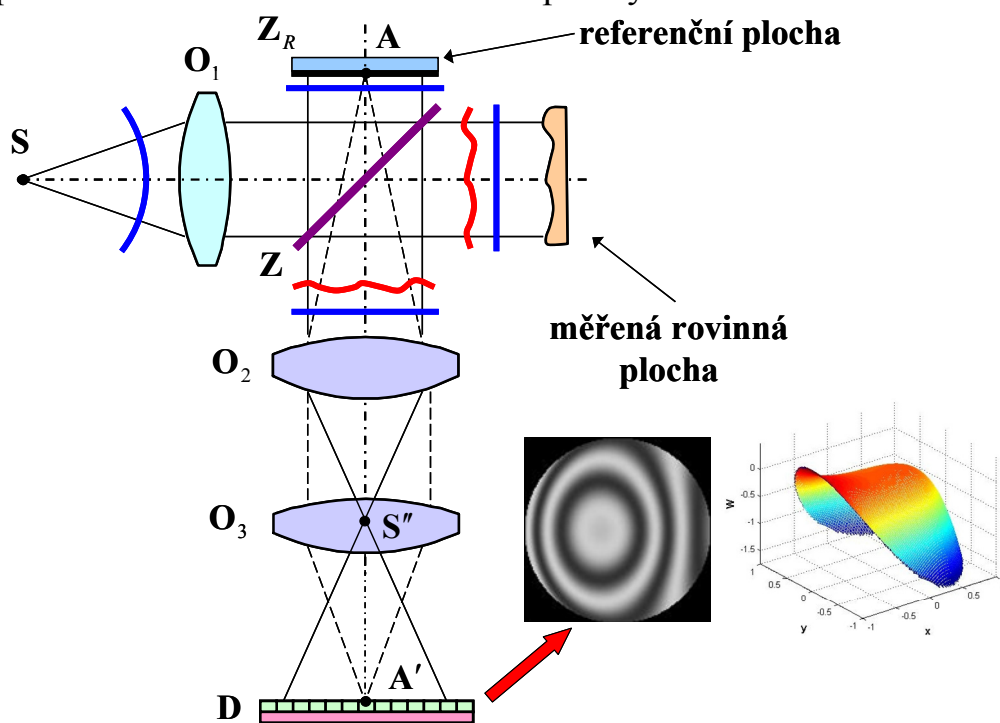
V této oblasti byly autorem analyzovány a navrženy zcela originální vícekové vyhodnocovací algoritmy [23,24], jež umožňují vyhodnotit interferenční pole při neměnné, ale předem neznámé hodnotě fázového posuvu. Takovéto algoritmy jsou numericky stabilní vůči lineárním chybám fázového posuvu a dávají tedy výborné výsledky v případě, že dokážeme fázový posuv ψ realizovat s vysokou opakovatelností, nicméně jeho skutečná hodnota se liší od nastavované hodnoty. Na pracovišti autora byla navržena též konstrukce a sestavení funkčního vzorku kompaktního fázového interferometru (obr.3), kde je fázový posuv zajišťován pomocí přesného piezoposuvu P-753 LISA od firmy Physik Instrumente. Interferometr je určen k přesnému měření tvaru rovinných a sférických optických ploch. V současné době je implementován do komplexní měřicí stanice pro výrobní kontrolu sférických ploch čoček ve fy.Meopta-optika, s.r.o.



Obr. 3: Konstrukce funkčního vzorku fázového interferometru

Principiální schéma Twyman-Greenova interferometru [3,4,7] uzpůsobeného pro měření rovinných ploch je uvedeno na obr.4. Světlo ze zdroje S, který se nachází v předměťové ohniskové rovině objektivu O_1 , je po průchodu objektivem O_1 transformováno na rovnoběžný paprskový svazek (rovinnou vlnu), který dopadá na polopropustné zrcadlo Z. Jedna část světla (referenční vlna) se od zrcadla Z odráží a dopadá na referenční rovinné zrcadlo Z_R . Referenční vlna se odrazí na referenčním rovinném zrcadle Z_R a prochází polopropustným zrcadlem Z do objektivů O_2 a O_3 . Druhá část světla prochází polopropustným zrcadlem Z a dopadá na měřenou rovinnou plochu. Po odrazu

rovinné vlny od měřené plochy, projde tato vlna zpět a po odrazu na polopropustném zrcadle Z dopadá na objektiv O_2 . V tomto prostoru dochází k interferenci obou vln. Obraz zdroje S je potom objektivem O_2 zobrazen do bodu S'' , který je totožný s obrazovým ohniskem tohoto objektivu. Za objektivem O_2 se nachází další objektiv O_3 , jehož střed vstupní pupily je totožný s bodem S'' . Pomocí objektivů O_2 a O_3 je pak bod A interferenčního pole, ležící na referenční ploše zrcadla Z_R , zobrazen do roviny detektoru D jako bod A' . Detektor registruje rozdělení intenzity interferenčního pole ve formě interferenčních proužků. Změnu fáze referenčního pole dosáhneme posuvem zrcadla Z_R (např. pomocí piezoposuvu). Pro měření sférických ploch je do měřicí větve interferometru zabudován objektiv, který vytváří sférickou vlnu, jež dopadá a odráží se od měřené sférické plochy.



Obr.4: Schéma Twyman-Greenova interferometru pro měření rovinných ploch

4.2. Vyhodnocování deformace vlnoplochy pomocí stříhové interferometrie

Odlišnou skupinou interferometrických metod, které se dají využít ke zjišťování fáze vlnového pole (resp. tvaru vlnoplochy), jsou metody založené na principu stříhové interferometrie [3,4,7, 57]. Princip spočívá v tom, že necháme interferovat vyšetřovanou vlnu s jednou nebo více prostorově modifikovanými replikami (kopiemi) stejné vlny. Výhodou metod stříhové interferometrie je značná necitlivost vůči nepříznivým vlivům při měření, nižší

experimentální náročnost a to, že není potřeba speciální referenční vlna. Referenční vlna je vytvářena z původní vlny např. příčným posunem nebo pootočením. Pro prostorovou modifikaci vlnoploch se používají různé optické prvky (planparalelní desky, difrakční prvky, polarizační prvky, apod.). Na pracovišti autora byl navržen a zkonstruován funkční vzorek polarizačního stříhového interferometru pro hodnocení kvality zobrazení mikroskopových objektivů (obr.5) [25].



Obr.5: Konstrukce funkčního vzorku stříhového interferometru

Tento interferometr používá pro rozdělení vlnoplochy Wollastonův hranol mezi dvěma zkříženými polarizátory. Rovnoměrně osvětlená štěrbina je testovanou optickou soustavou (mikroskopovým objektivem) zobrazena do roviny lokalizace interferenčních proužků Wollastonova hranolu. V důsledku dvojlomu světla dojde ve Wollastonově hranolu k rozdělení vstupujícího vlnového pole na dvě vlnová pole, která jsou vůči sobě úhlově pootočena a která spolu následně interferují. Vzniklý interferenční obrazec lze pozorovat pomocným mikroskopem nebo detekovat kamerou. Pokud se zvolí poloha Wollastonova hranolu tak, že úhel mezi směrem kmitů propuštěných polarizátorem a jedním z hlavních směrů dvojlomného prvku bude roven 45° , potom pro normovanou intenzitu světla prošlého soustavou stříhového interferometru platí

$$I(u, v, \lambda) = \sin^2 \frac{\varphi(u, v, \lambda)}{2} = \sin^2 \frac{\pi \delta(u, v, \lambda)}{\lambda}, \quad (19)$$

kde u a v jsou pravoúhlé souřadnice vyšetřovaného bodu interferenčního pole, λ je vlnová délka světla, $\varphi(u, v, \lambda)$ je fázový rozdíl interferujících vlnových polí a $\delta(u, v, \lambda)$ je dráhový rozdíl interferujících vlnových polí. Dále byla navržena originální metoda vyhodnocování malých fázových změn interferenčního pole,

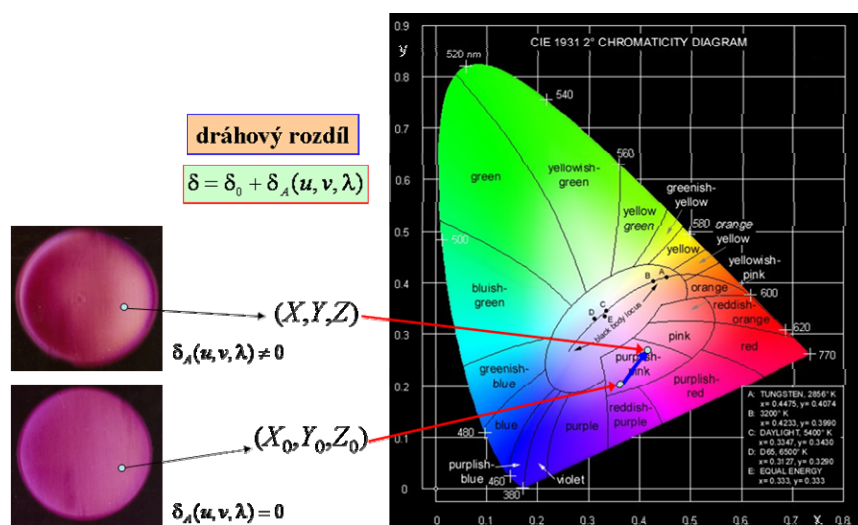
využívající interference polychromatického záření [26,27]. Změna fáze se v interferenčním poli projeví změnou barvy. Každé barvě můžeme přiřadit určitou hodnotu změny fáze a tuto změnu pak pomocí kolorimetrických metod vyhodnotit (obr.6). Dráhový rozdíl můžeme uvažovat ve tvaru $\delta = \delta_0 + \delta_A(u, v, \lambda)$, kde funkce $\delta_A(u, v, \lambda) = A(u, v) + B(u, v)\lambda + C(u, v)\lambda^2$ a δ_0 je počáteční dráhový rozdíl. Předpokládejme nyní, že δ_A vyjadřuje malou změnu dráhového rozdílu ($\delta_A \ll \delta_0$). Potom pro intenzitu interferenčního pole platí

$$I \approx \sin^2 \frac{\pi \delta_0}{\lambda} + \pi(A/\lambda + B + C\lambda) \sin \frac{2\pi \delta_0}{\lambda} + \pi^2(A/\lambda + B + C\lambda)^2 \cos \frac{2\pi \delta_0}{\lambda}. \quad (20)$$

Barevné souřadnice jednotlivých bodů interferenčního pole si můžeme vyjádřit jako

$$X(u, v) = \int_0^\infty \bar{x}(\lambda) S(\lambda) I(u, v, \lambda) d\lambda, \quad Y(u, v) = \int_0^\infty \bar{y}(\lambda) S(\lambda) I(u, v, \lambda) d\lambda, \\ Z(u, v) = \int_0^\infty \bar{z}(\lambda) S(\lambda) I(u, v, \lambda) d\lambda, \quad (21)$$

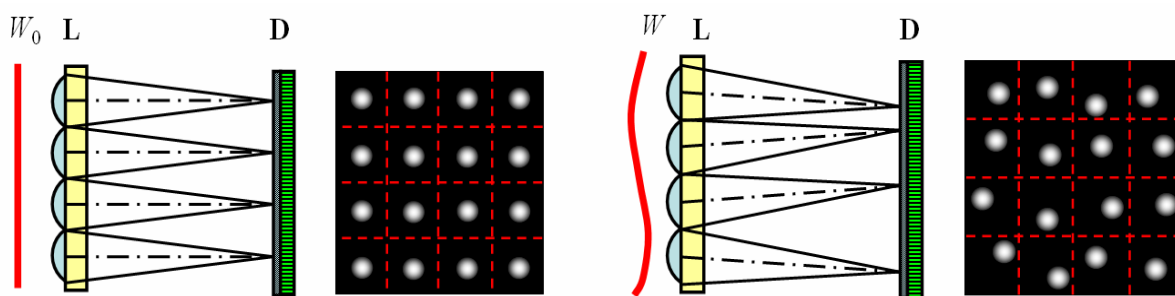
kde $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ jsou trichromatické členitele spektrální barvy vlnové délky λ a $S(\lambda)$ je spektrální rozdělení energie zdroje. Na základě měření barev a optimalizačních metod lze pro malé dráhové rozdíly získat velmi přesné vyhodnocení interferenčního pole [26,27].



Obr.6: Změna barvy v závislosti na změně dráhového rozdílu

4.3. Hodnocení kvality optických soustav pomocí senzoru vlnoplochy

Metoda je založena na principu prostorového vzorkování dopadající vlnoplochy a určení příčných paprskových aberací v rovině detekce. Klasická Hartmannova metoda realizuje prostorové vzorkování pomocí neprůhledného stínítka s maticí vhodně zvolených otvorů. U Shack-Hartmannovy metody je místo stínítka s otvory použito dvoudimenzionální pole mikročoček s ohniskovou vzdáleností f [7,28]. Vhodným maticovým senzorem poté můžeme detekovat nejčastěji v ohniskové rovině mikročoček rozdělení intenzity dopadající vzorkované vlnoplochy v rovině detekce. Výhodou tohoto postupu je vyšší účinnost využití dopadajícího záření. Na obr.7 je znázorněno principiální schéma Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy, který se skládá z matice mikročoček L a fotodetektoru D.



Obr.7: Schéma principu Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy

Mikročočky soustředí paprskové svazky do své ohniskové roviny, v níž se obvykle nachází fotodetektor (CCD), na kterém detekujeme rozdělení intenzity dopadajícího vlnového pole, jež je vzorkované pomocí pole mikročoček. Zaznamenané rozdělení intenzity v rovině detektoru je složeno ze stop jednotlivých paprskových svazků, odpovídající jednotlivým subaperturám mikročoček (obr.1). Dopadá-li na senzor rovinná (referenční) vlna W_0 , potom středy stop dílčích paprskových svazků, dopadajících na detektor, tvoří pravidelnou síť bodů (obr.7 vlevo). V případě, že vlnoplocha W , dopadající na matici mikročoček MLA, má obecný tvar (obr.7 vpravo), potom energetické středy stop paprskových svazků budou posunuty oproti předchozímu případu. Z odchylek $(\Delta x_j, \Delta y_j)$ středů jednotlivých stop lze poté určit hodnotu gradientu vlnoplochy a následně rekonstruovat její tvar. Platí

$$\frac{\Delta x_j}{L} = \frac{\partial W(x_j, y_j)}{\partial x}, \quad \frac{\Delta y_j}{L} = \frac{\partial W(x_j, y_j)}{\partial y}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (22)$$

kde L je vzdálenost obrazové hlavní roviny mikročoček od roviny fotodetektoru. Jednou z možností, jak určit tvar testované vlnoplochy W je použití některé z technik numerické integrace podle vztahu

$$W(x, y) = \int_C \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} dx + \int_C \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} dy + W(x_0, y_0), \quad (23)$$

kde C je křivka, spojující body sítě (x_0, y_0) a (x, y) , po které probíhá integrace. Jinou možností je vyjádření vlnoplochy pomocí vhodných polynomů P_k , např. Zernikeových, tj. $W(x, y) = \sum A_k P_k(x, y)$. Tuto aproximaci skutečné vlnoplochy $W(x, y)$ dosadíme do vztahů (22) pro složky gradientu vlnoplochy a získáme soustavu $2N$ lineárních rovnic

$$\frac{\Delta x_j}{f} = \sum_{k=0}^M A_k \frac{\partial P_k(x_j, y_j)}{\partial x}, \quad \frac{\Delta y_j}{f} = \sum_{k=0}^M A_k \frac{\partial P_k(x_j, y_j)}{\partial y}, \quad (24)$$

kde A_k jsou koeficienty aproximace zvolenými polynomy P_k , M je počet polynomů, N je počet bodů ($j = 1, 2, \dots, N$), ve kterých je známa dvojice odchylek středů stop paprskových svazků Δx_j a Δy_j . Získáme tak soustavu lineárních rovnic, kterou lze řešit metodou nejmenších čtverců.

Na pracovišti autora byly podrobně analyzovány a navrženy algoritmy pro vyhodnocování tvaru vlnoplochy pomocí tohoto typu senzoru a implementovány do software [28]. Bylo navrženo, zkonstruováno a otestováno několik typů senzorů vlnoplochy s různým dynamickým rozsahem a citlivostí. Na obr.8 je znázorněna jedna varianta senzoru vlnoplochy.



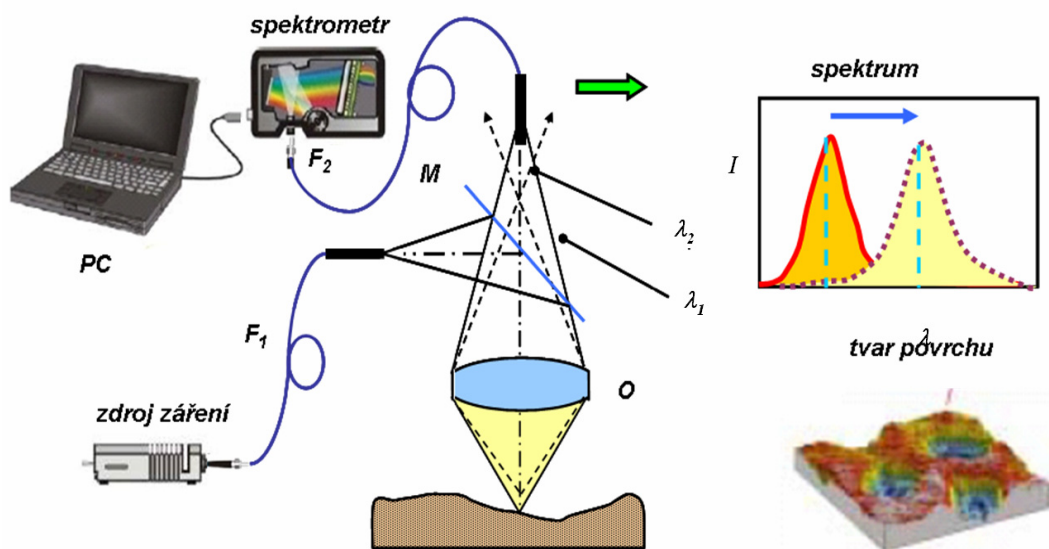
Obr.8: Maticový objektiv pro detekci tvaru vlnoplochy

Dále bylo navrženo a zkonstruováno zařízení pro kalibraci a justáž senzoru vlnoplochy a byla podána přihláška užitého vzoru na toto řešení. Senzor vlnoplochy společně se softwarem byl implementován ve firmě Meopta-optika, s.r.o. pro sériovou kontrolu kvality vyráběných optických soustav v UV a viditelné oblasti. Dosažitelná přesnost vyhodnocení je vyšší nežli $\lambda/15$ (P-V), kde λ je vlnová délka. Tato přesnost je srovnatelná s přesností běžných interferometrických metod a je zcela dostačující pro testování optických prvků a soustav v optickém průmyslu. Senzory vlnoplochy mohou být použity v mnoha experimentálních konfiguracích v procesu kontroly optické výroby. Lze je využít např. pro analýzu kvality zobrazení vyráběných optických soustav, měření odchylek tvaru vyráběných ploch optických prvků od nominálního tvaru, apod. Senzor vlnoplochy je možno též použít pro průmyslovou kontrolu tvaru optických prvků. Další oblastí využití gradientního senzoru vlnoplochy je měření kvality zobrazení optických soustav a výpočet zobrazovacích charakteristik (rozptylová funkce bodu - PSF, optická funkce přenosu - OTF, funkce přenosu kontrastu – MTF, Strehlova definice). Lze kontrolovat optické soustavy jako jsou např. dalekohledy, teleobjektivy, fotografické objektivy, jednoduché optické prvky, apod. Senzor je též v principu možno použít na měření decentricity a justáž optických soustav. V současné době probíhá ve spolupráci s Meoptou další vývoj a zdokonalování měřicích systémů pro výrobní kontrolu optické výroby v Meopta-optika, s.r.o. v rámci projektu aplikovaného výzkumu MPO.

4.4. Měření a analýza chromatickým konfokálním senzorem

Jedním z možných přístupů měření topografie povrchů je využití chromatického konfokálního senzoru (popř. jiných typů senzorů vzdálenosti jako např. laserových interferometrických senzorů) s principem skenování měřeného povrchu [4,29,30,58,59]. Na obr.9 je znázorněn schématicky princip měření topografie ploch využívající chromatického konfokálního senzoru. Ze zdroje záření (např. LED, halogenová žárovka, apod.) vychází polychromatické světlo, které je svedeno do optického vlákna F_1 , jež vytváří na svém konci prakticky bodový zdroj světla. Obraz konce vlákna F_1 je optickou soustavou objektivu O chromatického senzoru vytvořen v různých vzdálenostech a to v závislosti na vlnové délce světla. Po odraze od měřeného povrchu prochází světlo polopropustným zrcadlem M a dopadá na konec vlákna F_2 , jež svým čelem tvoří dírkovou clonu. Tímto vláknem je poté světlo vedeno do spektrofotometru. Intenzita světla, které touto dírkovou clonou projde, bude maximální jen pro světlo té vlnové délky, pro kterou je průměr paprskového

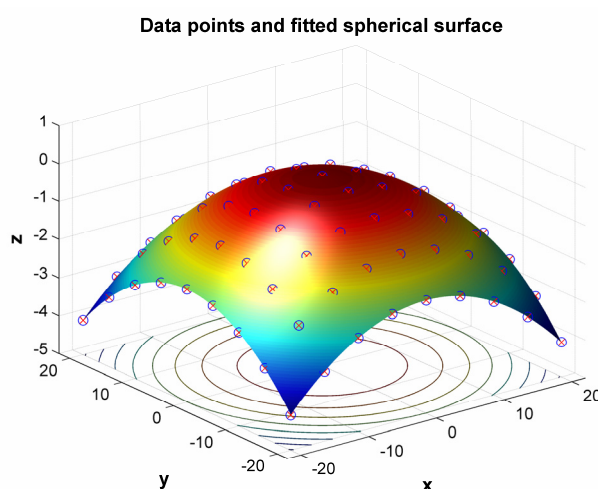
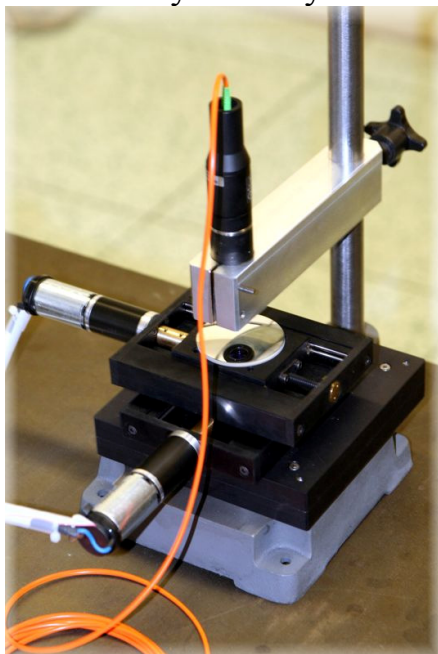
svazku v rovině dírký minimální, v našem případě to nastane pro vlnovou délku λ_1 . Pro ostatní vlnové délky λ_2 , odlišné od vlnové délky λ_1 , bude intenzita prošlého světla velmi malá. Spektrofotometrem detekujeme spektrální rozdělení intenzity, přičemž maximální intenzita (peak) bude odpovídat té vlnové délce světla, pro kterou byl průměr paprskového svazku v rovině konce vlákna F_2 minimální. Posouváme-li nyní vzorkem nebo senzorem v příčném směru, dostáváme maxima intenzity na spektrofotometru pro řadu vlnových délek a můžeme tedy snadno určit topografii měřené plochy.



Obr.9: Schéma principu konfokálního chromatického senzoru

Jak je vidět metoda využívá konfokální princip a jako optickou soustavu senzoru se využívají optické soustavy s velkou podélnou chromatickou aberací. Přesnost měření a rozsah senzoru poté závisí na průběhu závislosti chromatické aberace objektivu, rozlišení spektrometru a použitém zdroji záření. V této oblasti byly autorem analyzovány vlastnosti a navrženy varianty optických soustav tzv. hyperchromátů, tj. objektivů majících velkou podélnou chromatickou aberaci [29]. Na základě vlastností těchto objektivů pak byly navrženy optické soustavy umožňující provádět topografii ploch, tj. zjišťovat tvar těchto ploch a to na základě změny intenzity světla [30]. Chromatický senzor lze využít nejen k měření vzdálenosti, ale i pro měření tloušťky opticky transparentních vrstev. Dále byla autorem publikována analýza bezkontaktního měření tloušťky planparalelních desek a čoček s použitím chromatického konfokálního senzoru [31]. V této práci byly odvozeny zcela nové vztahy pro výpočet chyb měření v důsledku disperze a aberací, které mohou sloužit pro

korekci měření tloušťky pomocí chromatických senzorů. Na pracovišti autora byl též sestaven funkční vzorek měřicího skenovacího systému se softwarem pro vyhodnocení tvaru měřené plochy, využívajícího konfokálního chromatického senzoru MicroEpsilon. Na obr.10 je znázorněn funkční vzorek skenovacího systému pro měření 3D topografie povrchů. V současné době probíhá ve spolupráci s Meopta-optika, s.r.o. vývoj speciálního 3D měřicího skenovacího zařízení pro přesné měření tvaru optických ploch, zejména rotačních symetrických asfér.



Obr.10: Funkční vzorek skenovacího měřicího systému na bázi konfokálního chromatického senzoru a měřená data

4.5. Deflektometrická metoda rekonstrukce 3D povrchu

Jiným způsobem měření lesklých ploch a tedy i ploch optických jsou deflektometrické metody. Skupinou pracoviště autora bylo ukázáno, že problematika rekonstrukce tvaru plochy $z = f(x, y)$ při použití skenovací deflektometrické metody založené na měření gradientu plochy vede v obecném případě na řešení nelineární parciální diferenciální rovnici prvního řádu [32-34]

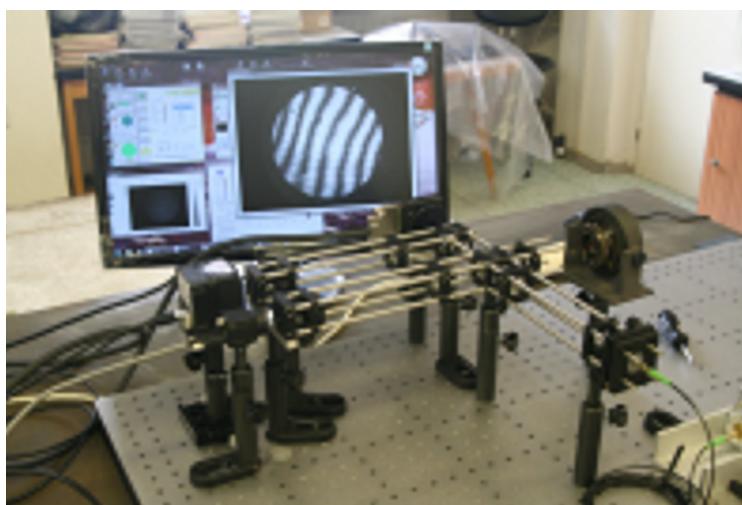
$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = F(x, y, z), \quad (25)$$

kde funkce $F(x, y, z)$ závisí na konkrétním experimentálním uspořádání měřicího senzoru. Byla navržena a publikována účinná matematická metoda

pro řešení tohoto problému, jejíž princip spočívá v převedení řešení diferenciální rovnice na optimalizační problém. Tvar měřené plochy je nahrazen vhodnou aproximační funkcí, jejíž koeficienty získáme pomocí nelineárních optimalizačních technik. Rekonstrukční metoda je velmi robustní vůči chybám měření a lze ji použít v praxi pro deflektometrickou rekonstrukci tvaru optických sférických a asférických ploch.

4.6. Analýza a aplikace prvků aktivní a adaptivní optiky

Poslední oblastí zmíněnou v této práci, kterou se autor a jeho spolupracovníci intenzivně zabývají v posledních letech, jsou možnosti aplikace prvků aktivní a adaptivní optiky do měřicích a zobrazovacích systémů pro korekci tvaru vlnoplochy. Jedná se zejména o teoretickou analýzu, návrh a aplikace optických soustav využívající aktivní optické prvky jako jsou kapalinové čočky [60-63] s proměnnou ohniskovou vzdáleností či deformovatelná zrcadla. Autor spolupublikoval v posledních 4 letech několik článků na toto téma [35-42]. Tyto prvky se jeví pro budoucnost velmi perspektivní neboť umožňují konstruovat optické soustavy, jež plynule mění svoje parametry jako je např. ohnisková délka, zvětšení či aberace bez nutnosti vzájemné změny pozice těchto prvků vůči sobě. Intenzivně byla též autorem zkoumána možnost implementace systému adaptivní optiky do interferometru pro měření optických ploch [43-45] a byla publikována nová metoda pro výpočet normály k asférické ploše [46]. Bylo navrženo několik variant systémů interferometru s adaptivním deformovatelným zrcadlem se zpětnou vazbou buď v referenční nebo v měřicí větvi interferometru. Řešení je chráněno užitným vzorem UPV 25807/2013 [47]. Výhodou takovýchto interferometrů je to, že se bude v rámci možností rozsahu adaptivního prvku přizpůsobovat tvaru měřené plochy a nebude tedy nutno v tak velké míře používat speciální optické prvky "šité na míru" měřené ploše. Pro měření rovinných a sférických ploch místo velmi drahých referenčních objektivů interferometru lze užít jen málo přesné objektivy, složené z jedné nebo několika běžných čoček, jejichž zbytkové aberace se principiálně dají vykompenzovat pomocí adaptivního optického prvku. Speciální a velmi nákladné objektivy interferometru nebo přesná nulová optika může být takovýmto způsobem nahrazena. Na pracovišti autora byla zkonstruována laboratorní sestava adaptivního interferometru [43-45], využívající pro generaci referenční plochy adaptivní zrcadlo MiraoTM 52 od firmy Imagine Optics, jehož tvar byl v uzavřené smyčce kontrolován pomocí Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy HASO. Na obr.11 je znázorněna laboratorní sestava interferometru.



Obr.11: Laboratorní sestava adaptivního interferometru

Jistou nevýhodou navržené metody je omezený dynamický rozsah hodnot změn vlnoplochy, jenž je dán současnými možnostmi deformovatelných zrcadel.

5. Závěr

Častou nevýhodou většiny stávajících metod, které jsou využívány pro bezkontaktní kontrolu v optické výrobě, je jejich poměrně složitá mechanická a optoelektronická konstrukce, vysoké pořizovací náklady, požadavky na vlastnosti vyšetřovaného vlnového pole a značná citlivost vyhodnocení na faktory, které nepříznivě limitují přesnost, opakovatelnost a dynamický rozsah měření (např. mechanické vibrace). Současné trendy ve vývoji vyhodnocovacích metod se proto snaží tyto nepříznivé vlivy nějakým vhodným způsobem eliminovat. Některé z uvedených nevýhod je možno redukovat návrhem optimalizovaných vyhodnocovacích algoritmů. Jiné mohou být v zásadě odstraněny návrhem zcela nových nebo modifikací stávajících měřících a vyhodnocovacích metod. Obecnou nevýhodou komerčních měřících systémů je jejich přílišná specializovanost a často též výrazná finanční náročnost pořízení těchto zařízení. Adaptace těchto zařízení na konkrétní podmínky optického provozu a spektra optických prvků a soustav, jež jsou vyráběny v optickém průmyslu, je pak velmi obtížné jak časově tak finančně nebo přímo nemožné. Proto se autor a jeho spolupracovníci dlouhodobou spoluprací s fy. Meopta-optika, s.r.o. snaží vyvíjet optické kontrolní metody adaptované přímo na podmínky a požadavky optické výroby v Meoptě. Některé z těchto metod [7-47] jsou popsány výše v tomto textu.

Literatura

1. Gross, H. - Blechinger, F. – Achtner, B.: Handbook of Optical Systems. Vol.4. Wiley-VCH, Weinheim 2008.
2. Mikš A.: Aplikovaná optika. Vydavatelství ČVUT, Praha 2008.
3. Malacara, D., (ed.): Optical Shop Testing, John Wiley, New York, 2007.
4. Dorband, B. - Muller, H. - Gross, H.: Handbook of Optical Systems. Vol.5. Wiley-VCH, Weinheim 2012.
5. Braunecker, B. - Tiziani, H.J. – Hentschel, R.: Advanced Optics Using Aspherical Elements. SPIE Press, Bellingham, 2008.
6. Williams, T.L.: The Optical Transfer Function of Imaging Systems. IOP Publishing, London, 1999
7. Novák, J.: Vybrané metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice. [Docentská habilitační práce]. Praha: ČVUT v Praze, 2006. 214 s.
8. Mikš, A. - Novák, J.: Formulation of Wave Aberration Coefficients Using Correction Zones. In *Proceedings of SPIE* Vol. 5962. Bellingham: SPIE, 2005, p. 926-937.
9. Mikš, A. - Novák, J.: Výpočet koeficientů vlnové aberace pomocí korekčních pásem. *Jemná mechanika a optika*. 2006, 51 (6), 169-174.
10. Mikš, A. - Novák, J.: Aplikace ortogonálních polynomů v teorii optického zobrazení. *Jemná mechanika a optika*. 2006, 51(3), 71-75.
11. Novák, J. - Mikš, A.: Least-Squares Fitting of Wavefront Using Rational Function. *Optics and Lasers in Engineering*. 2005, 43 (7), 776-787.
12. Mikš, A. - Novák, J.: Testing of Plano-Optical Elements. *Optica Applicata*. 2003, 33 (3), 391-402.
13. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Influence of Total Reflection on the Imaging Quality of Optical Systems. *Journal of the Optical Society of America*. 2005, 22 (1), 168-173.
14. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Calculation of Point-Spread Function for Optical Systems with Finite Value of Numerical Aperture. *Optik*. 2007, 118 (11), 537-543.
15. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Evaluation of Centricity of Optical Elements by Using a Point Spread Function. *Applied Optics*. 2008, 47 (18), 3299-3306.
16. Mikš, A. - Novák, J.: Analysis of Imaging Properties of a Vibrating Thin Flat Mirror. *Journal of the Optical Society of America*. 2004, 21(9),1724-9.
17. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Method for Analysis of Wavelength Dependence of Aberrations and Image Quality for Axial Object Point. *Applied Optics*. 2009, 48 (22), 4381-4388.

18. Mikš, A. - Novák, J.: Estimation of Accuracy of Optical Measuring Systems with respect to Object Distance. *Optics Express*. 2011, 19 (15), 14300-14314.
19. Mikš, A. - Novák, J.: Dependence of Camera Lens Induced Radial Distortion and Circle of Confusion on Object Position. *Optics & Laser Technology*. 2012, 44 (4), 1043-1049.
20. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Influence of the Refractive Index and Dispersion of Spectacle Lens on its Imaging Properties. *Optik*. 2007, 118 (12), 584-588.
21. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Third-order Design of Aspheric Spectacle Lenses. *Optik*. 2010, 121 (23), 2097-2104
22. Mikš, A. - Novák, J.: Fifth-Order Theory of Astigmatism of Thin Spherical Spectacle Lenses. *Optometry and Vision Science*. 2011, 88(11), 1369-74.
23. Novák, J.: Five-Step Phase-Shifting Algorithms with Unknown Values of Phase Shift. *Optik*. 2003, 114 (2), 63-68.
24. Novák, J. - Novák, P. - Mikš, A.: Multi-step Phase-shifting Algorithms Insensitive to Linear Phase Shift Errors. *Optics Communications*. 2008, 281 (21), 5302-5309.
25. Novák, J. - Novák, P. - Mikš, A.: A Compact Shearing Interferometer for Testing Optical Systems. In *Proceedings of SPIE Vol. 5856*. Washington: SPIE, 2005, p. 581-588.
26. Mikš, A.-Novák, J.-Novák, P.: Colorimetric Method for Phase Evaluation. *Journal of the Optical Society of America*. 2006, 23(4), 894-901.
27. Mikš, A. - Novák, J.: Kolorimetrické vyhodnocování malých fázových změn vlnového pole. *Jemná mechanika a optika*. 2006, 51 (7-8), 203-208.
28. Novák, J. - Mikš, A. - Novák, P.: Application of Shack-Hartmann Wave-Front Sensor for Testing Optical Systems. In *Proceedings of SPIE Vol. 6609*. Bellingham: SPIE, 2007, p. 660915-1-660915-11.
29. Novák, J. - Mikš, A.: Hyperchromats with Linear Dependence of Longitudinal Chromatic Aberration on Wavelength. *Optik*. 2005, 116 (4), 165-168.
30. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P. - Kajnar, P.: Influence of Material Dispersion on the Measurement Accuracy of Chromatic Sensors. In *Proceedings of SPIE Vol. 7389*. Bellingham: SPIE, 2009, p. 73892K-1-6.
31. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Analysis of Method for Measuring Thickness of Plane-Parallel Plates and Lenses using Chromatic Confocal Sensor. *Applied Optics*. 2010, 49 (17), 3259-3264.
32. Mikš, A. - Novák, J.: Deflectometric Method for Surface Shape Reconstruction From Its Gradient, *Optics Express*. 2012, 20(27), 28341-46.

33. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Method for Reconstruction of Shape of Specular Surfaces Using Scanning Beam Deflectometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013, 51(7), 867–872.
34. Mikš, A. - Novák, J. - Opat, J. - Pokorný, P.: Metoda rekonstrukce tvaru měřené optické plochy pomocí deflektometrického principu. *Jemná mechanika a optika*. 2013, 58 (3), 89-93.
35. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Generalized Refractive Tunable-focus Lens and Its Imaging Characteristics. *Optics Express*. 2010, 18 (9), 9034-9047.
36. Mikš, A. - Novák, J.: Analysis of Two-Element Zoom Systems Based on Variable Power Lenses. *Optics Express*. 2010, 18,(7), 6797-6810.
37. Mikš, A. - Novák, J.: Third-Order Aberrations of the Thin Refractive Tunable-Focus Lens. *Optics Letters*. 2010, 35(7), 1031-1033.
38. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Theoretical Analysis of Imaging Properties of a Pressure-actuated Deformable Mirror for Adaptive Compensation of Rotationally Symmetrical Wavefronts. *Optics and Lasers in Engineering*. 2011, 49 (11), 1268-1273.
39. Mikš, A. - Novák, J.: Analysis of Three-element Zoom Lens Based on Refractive Variable-focus Lenses. *Optics Express*. 2011, 19 (24), 23989-96.
40. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Chromatic Aberrations of Thin Refractive Variable-focus Lens. *Optics Communications*. 2012, 285 (10-11), 2506-09.
41. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Algebraic and Numerical Analysis of Imaging Properties of Thin Tunable-focus Fluidic Membrane Lenses with Parabolic Surfaces. *Applied Optics*. 2013, 52 (10), 2136-2144.
42. Novák, J. - Mikš, A.: Membránová kapalinová čočka. Užiténý vzor Úřad průmyslového vlastnictví, 24834. 2013-01-21.
43. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Adaptivní dvousvazkový interferometr pro měření optických ploch. *Jemná mechanika a optika*. 2013, 58(2), 59-62.
44. Novák, J. - Novák, P. - Mikš, A.: Analysis of Interferometer With Adaptive Reference Wave. In OSAV' 2012. Melville (NY): AIP Publishing LLC, 2013, p. 115-122.
45. Novák, J. - Novák, P. - Mikš, A.: Interferometer with Deformable Mirror for Adaptive Testing of Flat, Spherical and Aspheric Optical Surfaces. In OPTIMESS2012. Maastricht: Shaker Publishing BV, 2013, p. 261-272.
46. Mikš, A. - Novák, P. - Novák, J.: Calculation of Aberration and Direction of a Normal to Aspherical Surface. *Optics & Laser Technology*. 2013, 45, 708-712.

47. Mikš, A. - Novák, J. - Novák, P.: Adaptivní nástavec interferometru. Užitečný vzor Úřad průmyslového vlastnictví, 25807. 2013-08-27.
48. Born M. - Wolf, E.: Principles of Optics. Pergamon Press, 1968.
49. Welford, W. T.: Aberrations of the Symmetrical Optical Systems. Academic Press, 1974.
50. Hopkins, H. H.: Wave Theory of Aberrations. Oxford University, 1950.
51. Braat, J. J. M. - van Haver, S. - Janssen, A. J. E. M. - Dirksen, P.: Assessment of Optical Systems by Means of Point-spread Function. *Prog. Opt.* 51, 349–468, 2008.
52. van den Bos, A.: Aberration and the Strehl ratio, *J. Opt. Soc. Am. A* 17, 356–358, 2000.
53. Janssen, A. J. E. M. - van Haver, S. - Braat, J. J. M. - Dirksen, P.: Strehl Ratio and Optimum Focus of High Numerical-aperture Beams. *J. Eur. Opt. Soc. Rap. Public.* 2, 07008 (2007).
54. Mahajan, V. N.: Strehl Ratio for Primary Aberrations in Terms of Their Aberration Variance. *J. Opt. Soc. Am.* 73, 860–861, 1983.
55. Janssen, A. J. E. M. - van Haver, S. - Dirksen, P. - Braat, J. J. M.: Zernike Representation and Strehl Ratio of Optical Systems with Variable Numerical Aperture. *J. Mod. Opt.* 55, 1127–1157, 2008.
56. ISO 10110-12 Optics and photonics - Preparation of drawings for optical elements and systems - Part 12: Aspheric surfaces.
57. Malacara D, Servin M, Malacara Z.: Interferogram Analysis for Optical Testing. New York: Marcel Dekker; 1998.
58. Steudle, D. - Wegner, M. - Tiziani, H. J.: Confocal Principle for Macro- and Microscopic Surface and Defect Analysis, *Opt. Eng.* 39, 32–39, 2000.
59. Lücke, P. - Last, A. - Mohr, J. - Ruprecht, A. K. - Osten, W. - Tiziani, H. - Lehmann, P.: Confocal Micro-optical Distance Sensor for Precision Metrology. *Proc. SPIE* 5459, 180–184, 2004.
60. Berge B. - Peseux, J.: Variable Focal Lens Controlled by an External Voltage: An Application of Electrowetting, *Eur. Phys. J. E* 3, 159–163, 2000.
61. Hendriks, B. H. W. - Kuiper, S. - van As M. A. J. - Renders, C. A. - Tukker, T. W.: Electrowetting-based Variable-focus Lens for Miniature Systems. *Opt. Rev.* 12, 255–259, 2005.
62. Zhang, D. Y. - Justis, N. - Lo, Y. H.: Fluidic Adaptive Zoom Lens with High Zoom Ratio and Widely Tunable Field of View, *Opt. Commun.* 249(1-3), 175–182, 2005.
63. Ren, H. W. - Wu, S. T.: Variable-focus Liquid Lens, *Opt. Express* 15(10), 5931–5936, 2007.

Doc.Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Jiří Novák (*1975 ve Slaném) absolvoval v roce 1999 s vyznamenáním Fakultu stavební ČVUT v Praze. Doktorské studium na ČVUT v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství absolvoval s vyznamenáním v roce 2002 obhajobou disertační práce "Metody vyhodnocování interferenčních polí pro měření tvaru a deformací ploch". Habilitační práci na téma "Vybrané metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice" obhájil na Fakultě strojní ČVUT v Praze v únoru 2008 a na jejím základě byl jmenován docentem pro obor Aplikovaná fyzika. Od roku 2001 působí jako pracovník katedry fyziky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Jako externí výzkumný pracovník působil též v Meopta-optika, s.r.o. v letech 2004-2008. Jeho specializací je výzkum v oblasti optických metod pro měření tvaru povrchů a hodnocení kvality optických soustav a prvků, analýzy a syntézy optických soustav s klasickými a aktivními optickými prvky a aplikace adaptivní optiky v zobrazovacích a měřicích systémech. V těchto oblastech publikoval již 45 článků v prestižních impaktovaných zahraničních časopisech s více než 100 citacemi na své práce a H-indexem 5 (bez autocitací). Za svou publikační činnost získal dvakrát Cenu rektora ČVUT za prestižní publikace v roce 2010 (cena II.stupně) a v roce 2011 (cena I.stupně). Dále je autorem nebo spoluautorem 30 článků v dalších recenzovaných časopisech, více než 90 příspěvků na mezinárodních konferencích, jedné kapitoly v mezinárodní knize, tří patentů, pěti užitných vzorů a více než 20 realizací typu funkční vzorek, prototyp, ověřená technologie a software, z nichž některé našly přímé uplatnění ve firmě Meopta-optika, s.r.o. Během posledních 10 let se významně podílel a podílí na deseti projektech základního i aplikovaného výzkumu (MPO, MŠMT, GAČR). V letech 2004-2006 byl vedoucím dvou výzkumných týmů ve firmě Meopta-optika řešících projekty zaměřené na perspektivní metody vyhodnocování kvality optických soustav a ploch. Doc.Novák byl členem programových a organizačních výborů několika významných mezinárodních vědeckých konferencí, je aktivním členem zahraničních i tuzemských vědeckých společností (SPIE, OSA, EOS, ČSSF, JČMF, ČMS, ČSVK), podílí se na činnosti redakční rady časopisu Jemná mechanika a optika a časopisu American Journal of Optics and Photonics a je členem rady výzkumného centra TOPTEC (Turnov). Byl školitelem 3 doktorandů, 25 jeho studentů úspěšně obhájilo diplomové a bakalářské práce. Významně se podílí na výuce v bakalářském, magisterském i doktorském programu na Fakultě stavební (FSv) a Fakultě biomedicínského inženýrství (FBMI) ČVUT. Byl garantem a podílel se významně na akreditaci a rozvoji nového oboru Optika a optometrie na FBMI, kde je v současnosti předsedou pedagogické rady tohoto oboru.