

Nová koncepční a konstrukční řešení pro zobrazování s PMS

P. Bouchal (FSI VUT Brno) a Z. Bouchal (KO PŘF UP Olomouc)



Technická agentura
České republiky



Centra
kompetence

Projekt TE01020229 (Centrum digitální optiky) je řešen s finanční podporou TA ČR

PB 4 Zobrazování s podporou technologie PMS

Garant: R. Chmelík

Program PB4:

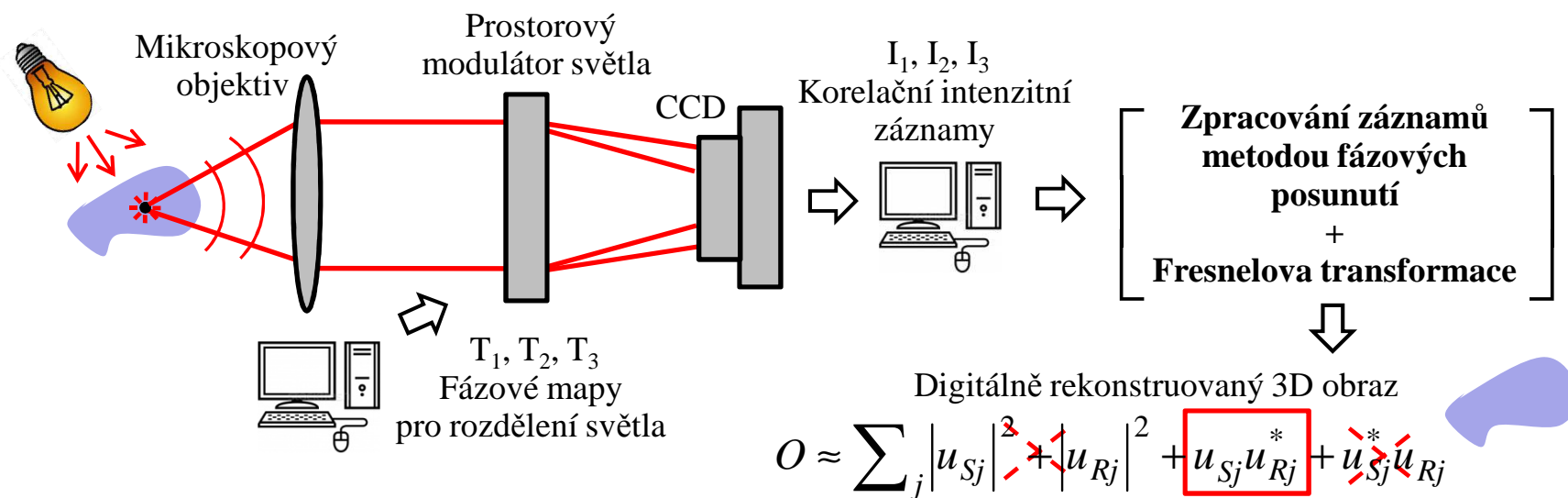
- **Metody a systémy pro jednocestnou nekoherentní korelační holografii** (VUT a UP)
 - Metody pokročilé rekonstrukce obrazu v holografickém mikroskopu (VUT)
 - Měření optických ploch pomocí PMS (Meopta)

Obsah příspěvku:

- Nekoherentní korelační mikroskopie – metody, ověřovací experimenty, laboratorní systémy
 - přehled výsledků dosažených v CDO
 - nové výsledky za období 2013-2014
- Mechanický konstrukční návrh korelačního mikroskopu (M. Antoš, VUT – samostatný příspěvek)
 - Náměty pro využití korelačního zobrazování mimo mikroskopii (holografický korelační teleskop, vírová metrologie)

Základní princip korelační mikroskopie

Stav na počátku řešení projektu CDO

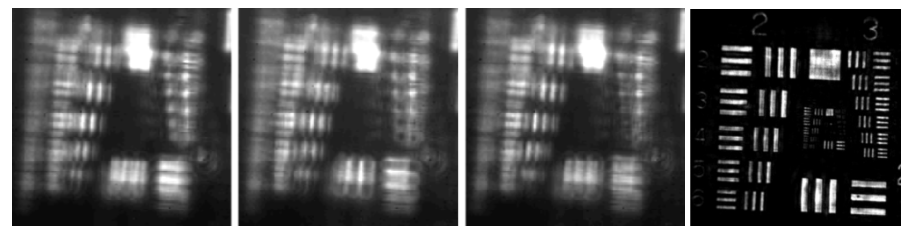


Výpočetní model pro základní geometrii vln.

- ☺ Ověření záznamu a rekonstrukce testovacích objektů v základním režimu zobrazení.

Používáno záření s úzkým spektrem (1-5 nm).

- ☹ Nízké rozlišení (MO nevyužit).
- Malé zorné pole (MO nevyužit).



Pokročilá korelační mikroskopie

Přehled hlavních výsledků PB4 :

- Návrh a realizace systému s rozšířeným zorným polem.
- Optimalizace geometrie experimentu z hlediska rozlišení.
- Ověření možnosti sub-difrakčního rozlišení.
- Návrh a realizace korelačního zobrazení se spirálním zvýrazněním hran.

Výsledky za období 2013-2014:

- Stanovení podmínek pro širokospektrální korelační zobrazení.
- Achromatické PMS zobrazení v bílém světle.
- Korelační holografické zobrazení ve fluorescenční mikroskopii.
- Princip rotujícího zobrazení a vřové lokalizace polohy v digitální holografii.
- Experimentální lokalizace polohy částic v korelační mikroskopii.

System s plným korelačním překrytím

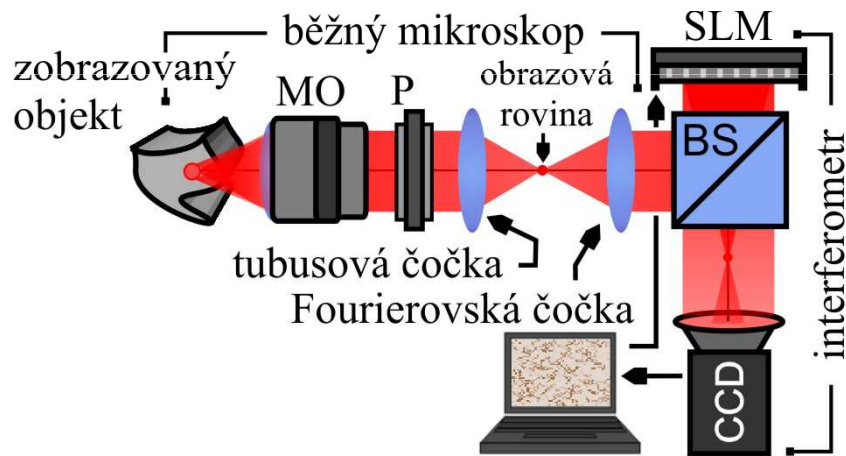
J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 8, 13011 (2013)

www.jeos.org

Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams

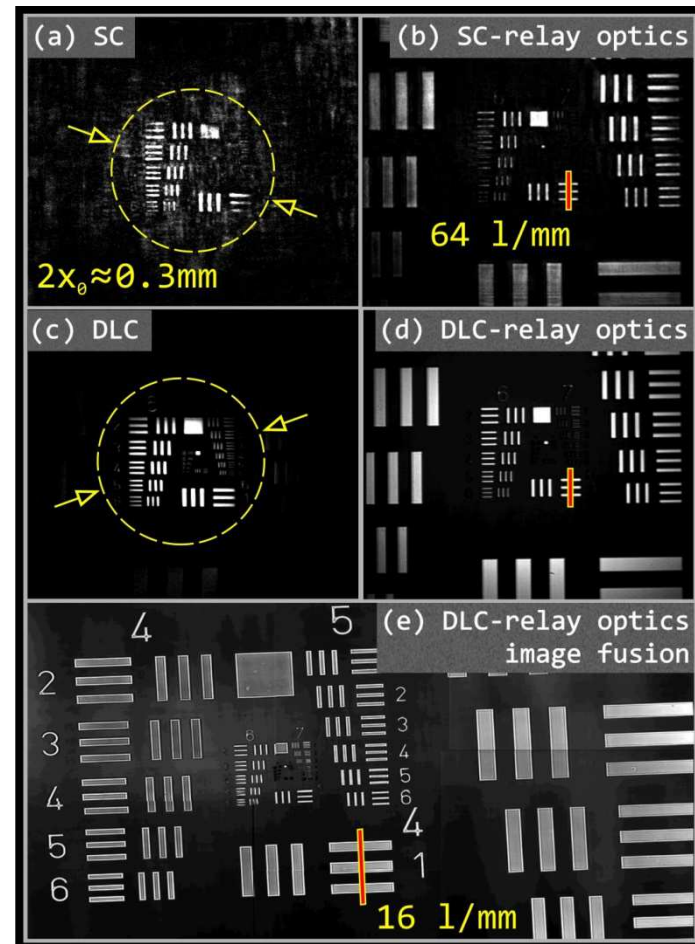
P. Bouchal
petr.bouchal@ceitec.vutbr.cz
Z. Bouchal

Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Technická 11, 616 00 Brno, Czech Republic
Department of Optics, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic



Přínos vložené optiky:

- perfektní překrytí interferujících vln
 - výrazné rozšíření zorného pole
- zachování rozlišení v celém zorném poli
- přenos prostorového spektra na modulátor



Korelační zobrazení se spirálním kontrastem

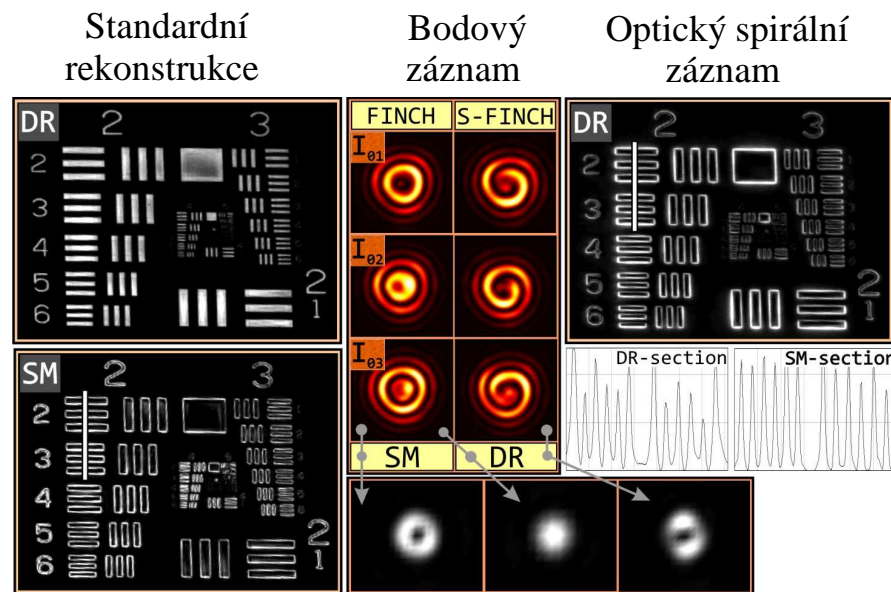
Selective edge enhancement in three-dimensional vortex imaging with incoherent light

Petr Bouchal¹ and Zdeněk Bouchal^{2,*}

¹Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Technická 10, 616 00 Brno, Czech Republic

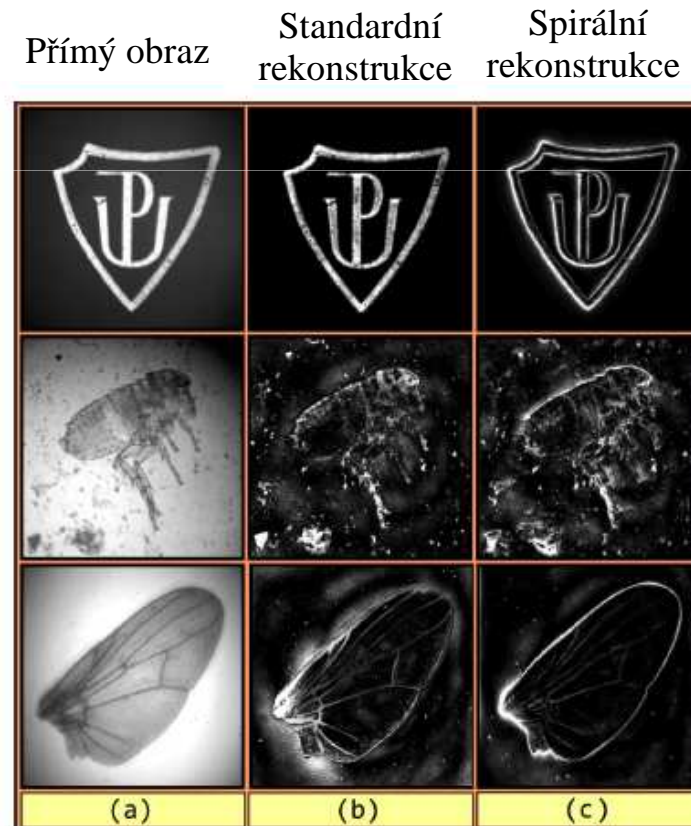
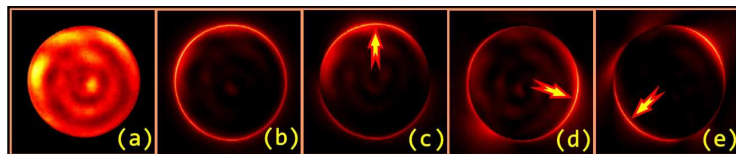
²Department of Optics, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

*Corresponding author: bouchal@optics.upol.cz



Digitální spirální rekonstrukce

Vířová a standardní PSF



Cesta k sub-difrakčnímu rozlišení v bílém světle

New Journal of Physics
The open access journal for physics

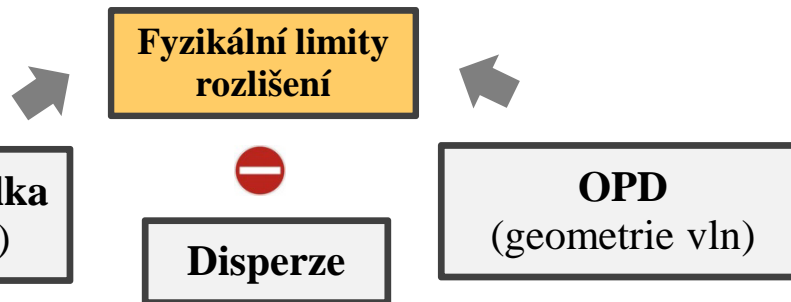
Concept of coherence aperture and pathways toward white light high-resolution correlation imaging

P Bouchal¹ and Z Bouchal^{2,3}

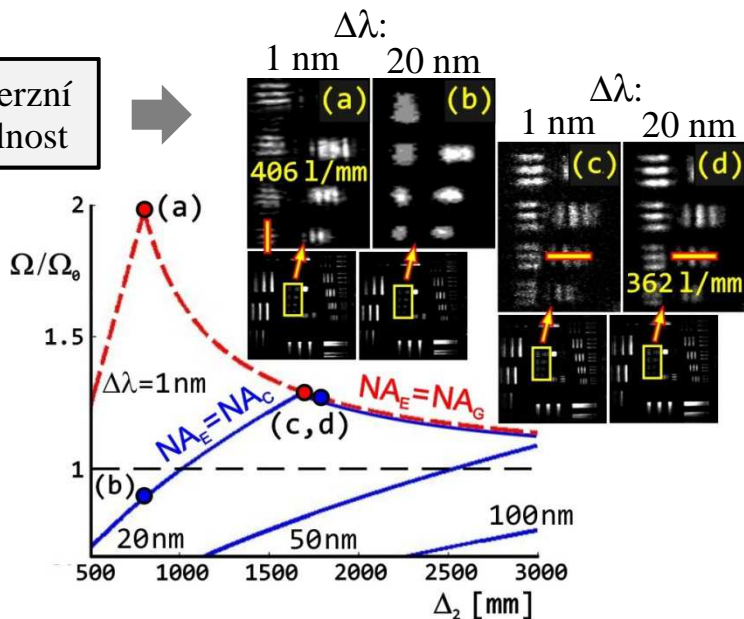
¹ Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Technická 10, 616 00 Brno, Czech Republic

² Department of Optics, Palacký University, 17 Listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

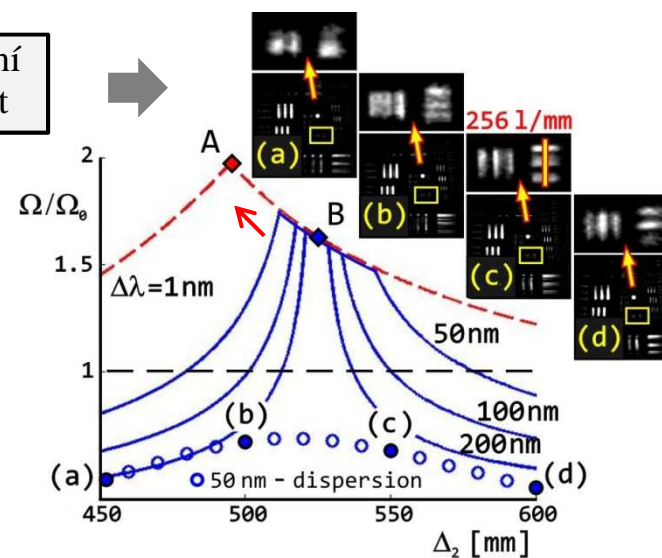
E-mail: bouchal@optics.upol.cz



Disperzní odolnost

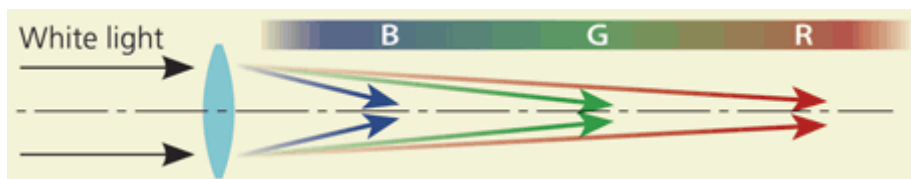


Disperzní citlivost

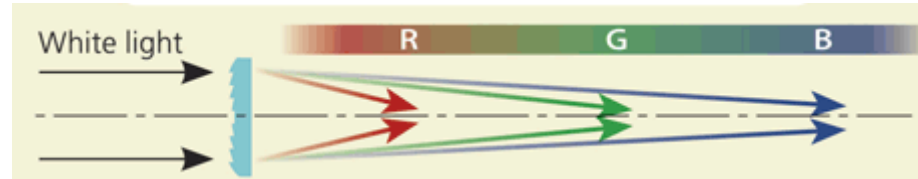


Refraktivní a difrakční disperze

Refraktivní prvek



Difrakční prvek



$$V_{ref} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

$$35 < V_{glass} < 65$$

$$17 < V_{LC} < 40$$

**Abbeovo
číslo**

$$V_{dif} = \frac{\lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad V_{dif} = -3.45$$

$$V_{ref-dif} = \frac{n_D \lambda_D}{n_F \lambda_F - n_C \lambda_C}, \quad V_{ref/dif} = -3.7$$

Projevy difrakční disperze:

- chromatická vada
- chromatická změna difrakční účinnosti

Spektrální difrakční účinnost

$$\eta_m(\lambda) = \sin^2 \left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m \right) \right]$$

Podélná chromatická vada

$$\Delta f = \lambda_D \frac{\Delta \lambda}{\lambda_F \lambda_C} f_D \approx 0.3 f_D$$

Integrální difrakční účinnost

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_C - \lambda_F} \int_{\lambda_F}^{\lambda_C} \eta_m(\lambda) d\lambda, \quad \bar{\eta}_1 \approx 0.97$$

Korekce difraktivní disperze PMS

Achromatic correction of diffractive dispersion in white light SLM imaging

Zdeněk Bouchal,^{1,*} Vladimír Chlup,¹ Radek Čechovský,¹
Petr Bouchal,^{2,3} and Ioan Cristian Nistor¹

¹Department of Optics, Palacký University, 17. listopadu 1192/12,
771 46 Olomouc, Czech Republic

²Institute of Physical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
Brno University of Technology, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic

³Central European Institute of Technology, Brno University of Technology,
Technická 10, 616 00 Brno, Czech Republic

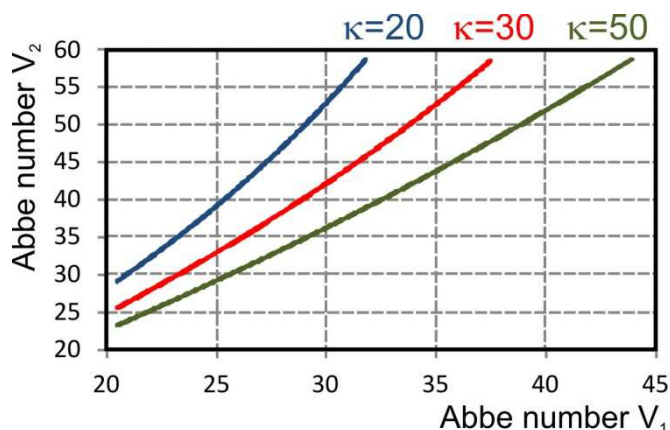
*bouchal@optics.upol.cz

#206390 - \$15.00 USD
(C) 2014 OSA

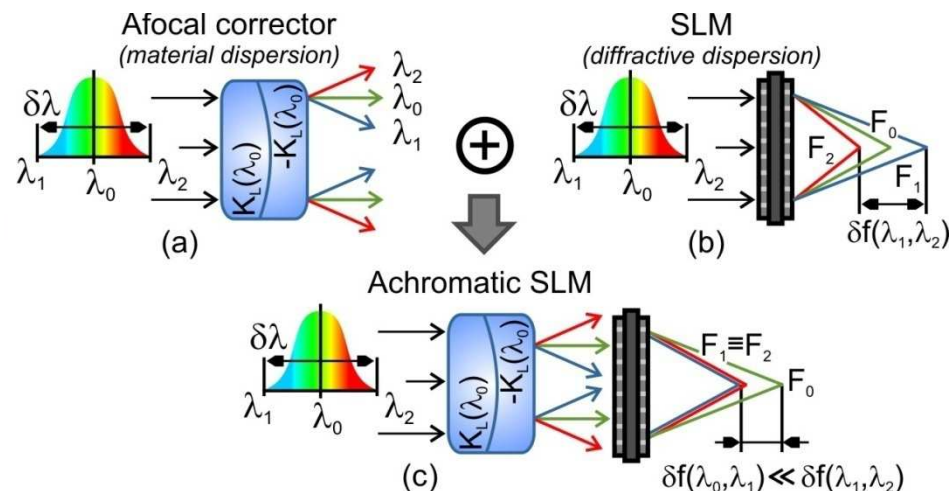
Received 12 Feb 2014; revised 5 Apr 2014; accepted 7 Apr 2014; published 12 May 2014
19 May 2014 | Vol. 22, No. 10 | DOI:10.1364/OE.22.012046 | OPTICS EXPRESS 12046

Podmínka achromatické korekce

$$\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} + \frac{1}{\kappa V_{dif}} = 0, \quad \kappa = \frac{f_{dif}(\lambda_0)}{f_L(\lambda_0)}$$



Princip achromatické korekce



Sekundární spektrum

$$\delta f(\lambda_0, \lambda_1) = \frac{f^2(\lambda_0)}{f_L(\lambda_0)} \left[\frac{P_1}{V_1} - \frac{P_2}{V_2} + \frac{P_{dif}}{\kappa V_{dif}} \right]$$

$$P_j = \frac{n_1(\lambda_1) - n_1(\lambda_0)}{n_1(\lambda_1) - n_1(\lambda_2)}, \quad P_{dif} = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

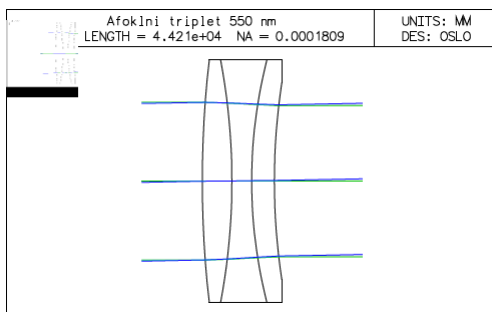
Apochromatizace

$$P_1 = P_2 = P_{dif}$$

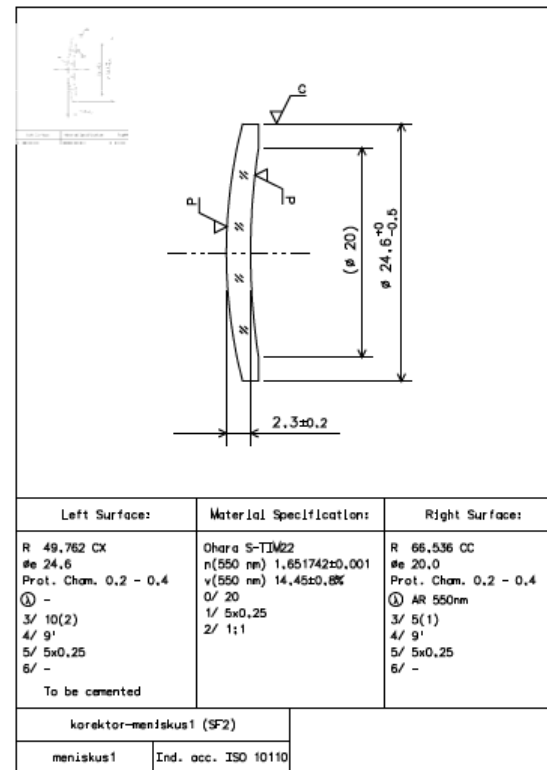
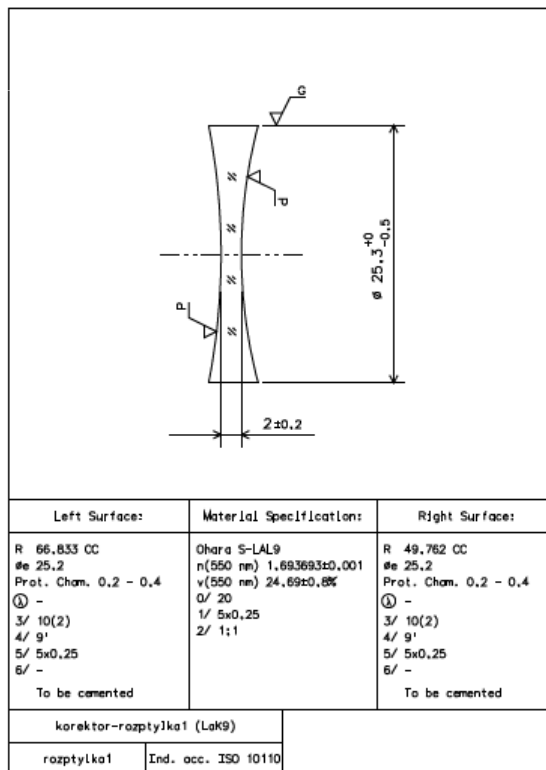
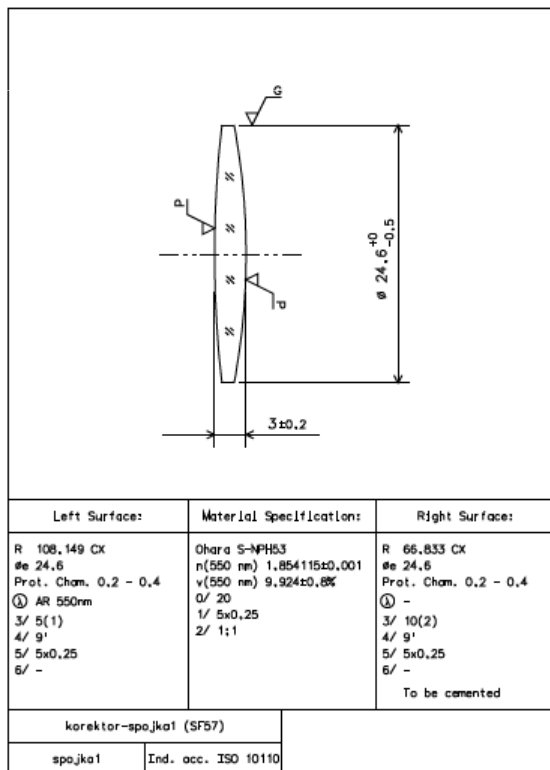
$$V_1 = \frac{P_1 - P_{dif}}{P_2 - P_{dif}}$$

dostupná skla nespĺňujú

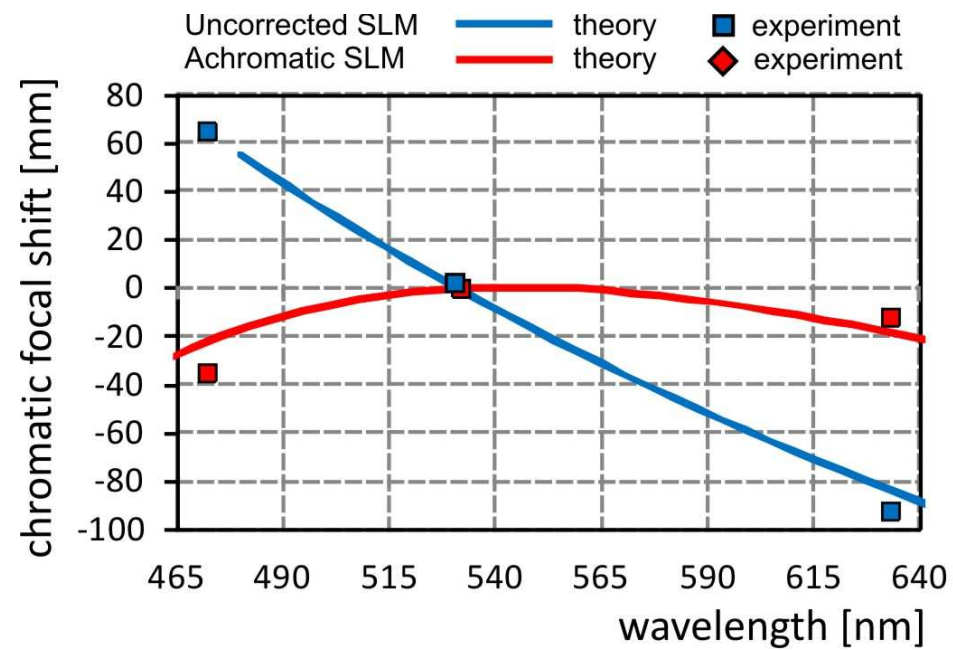
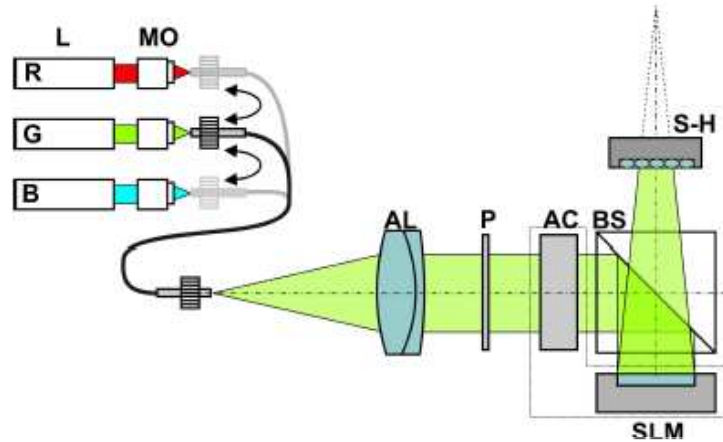
Achromatický korektor pro PMS Hamamatsu



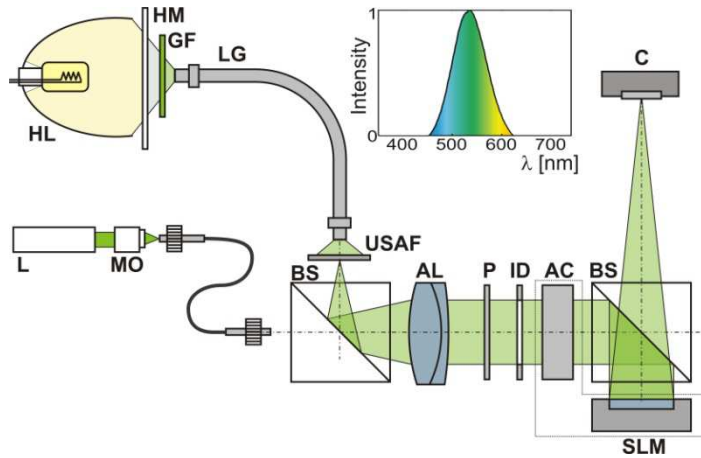
Návrh a dokumentace KO Realizace Meopta-optika, s.r.o.



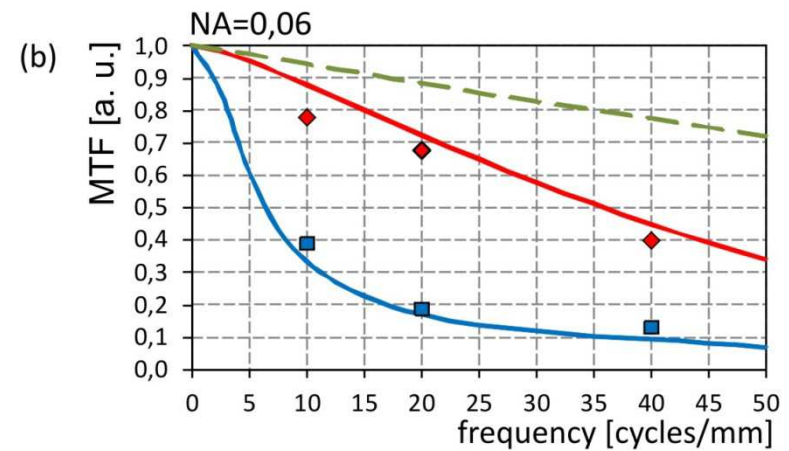
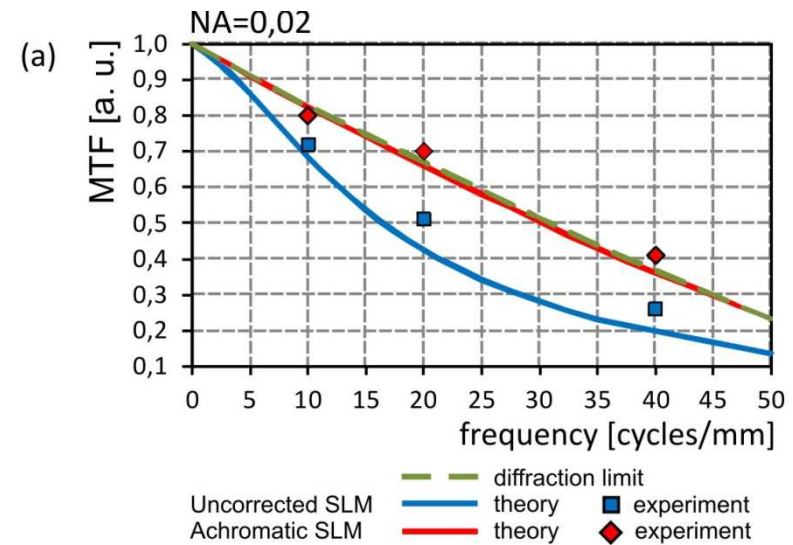
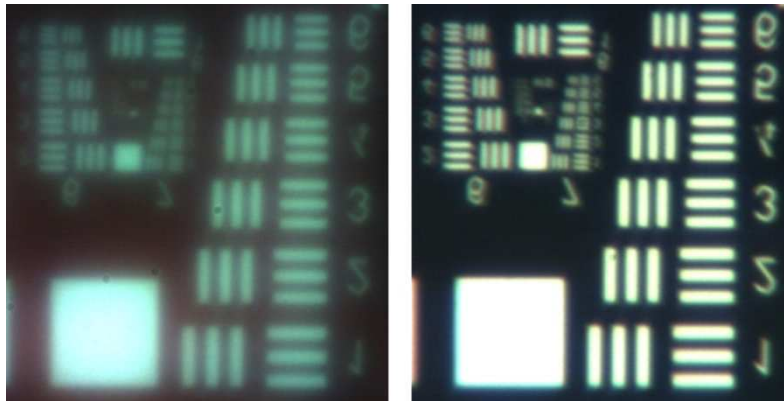
Achromatická korekce PMS



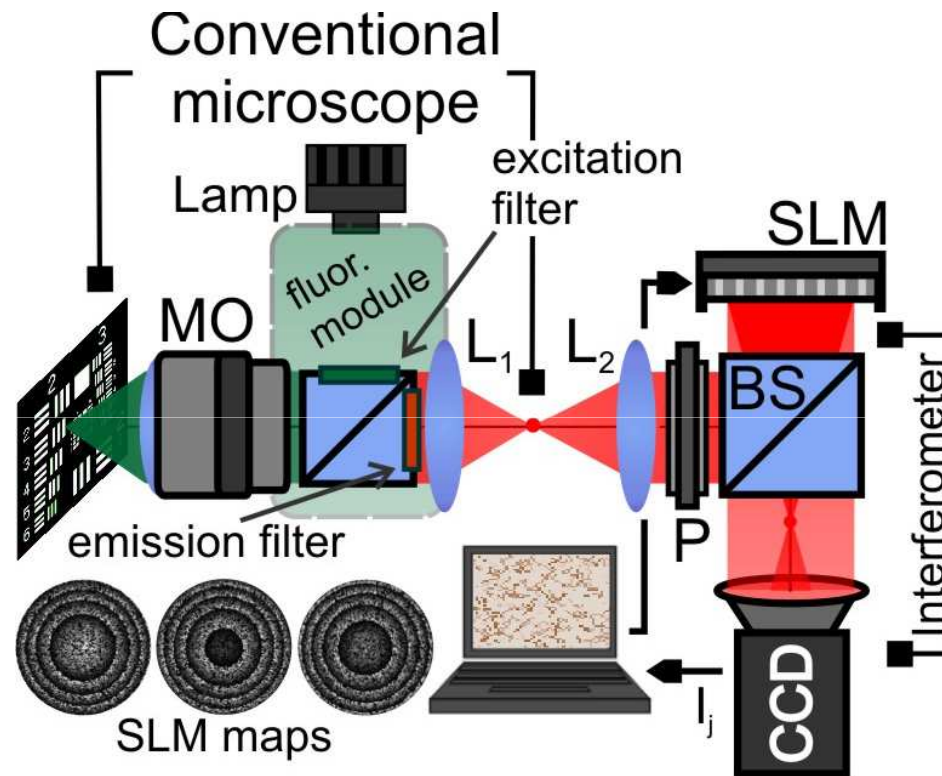
Achromatické PMS zobrazení



$\Delta\lambda=80$ nm



Konstrukce pro korelační fluorescenční mikroskopii



zdroj
Xe výbojka

excitační / emisní filtr
365 nm / 550 nm
543 nm / 582 nm
628 nm / 680 nm

ověřovací experimenty
fluorescenční USAF test
fixované fluorescenční kuličky 500 nm

Vírová lokalizace polohy v digitální holografii

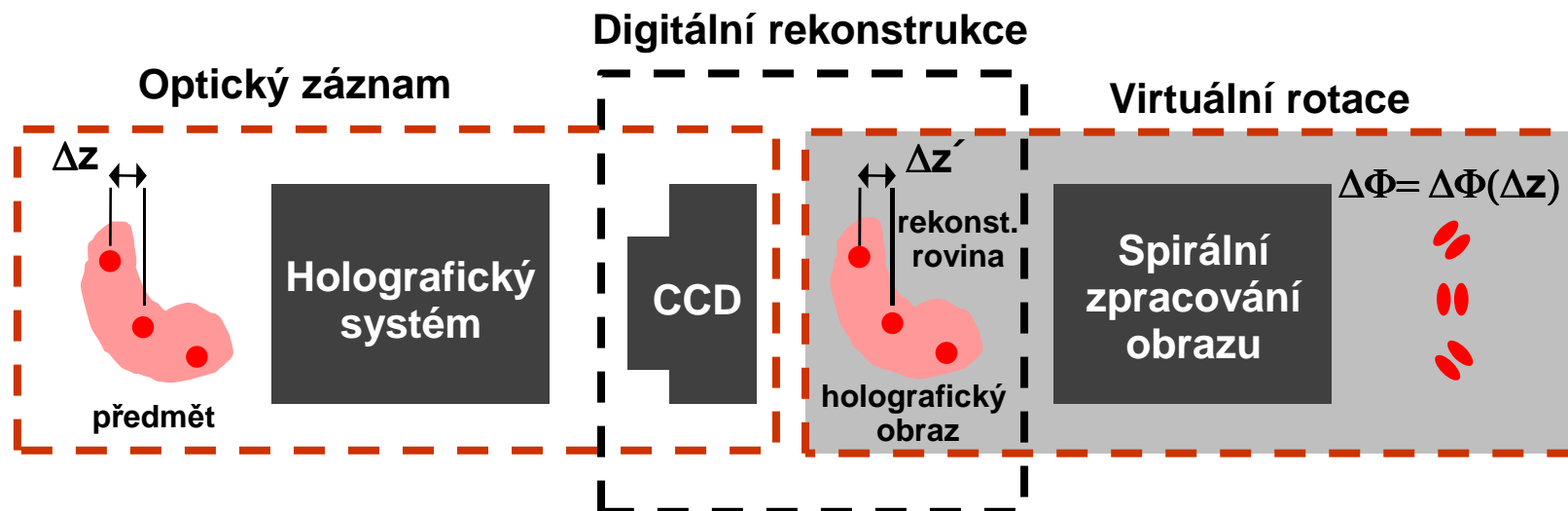
Axiální lokalizace v optické mikroskopii

- změna tvaru nebo otočení rozostřeného obrazu
- omezený podélný rozsah (hloubka ostrosti MO)
- nutnost použít 4f systém
- komplexní modulace – malá účinnost

Axiální lokalizace v digitální holografii

- nižší přesnost než v OM
- větší rozsah než v OM
- nutnost opakovaných záznamů předmětu („phase shifting“)
- vysoká časová náročnost algoritmů pro vyhodnocení polohy (peak searching, quantification of image sharpness, 3D deconvolution, inverse problem approach)

$$E \propto FT^{-1} \left\{ S \quad FT^1 \left\{ FrT \{ H \} \right\} \right\}$$



Lokalizace pomocí elektrického pole vírového svazku

Non-iterative holographic axial localization using complex amplitude of diffraction-free vortices

Petr Bouchal^{1,2,*} and Zdeněk Bouchal³

¹Institute of Physical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic

²Central European Institute of Technology, Brno University of Technology, Technická 10, 616 00 Brno, Czech Republic

³Department of Optics, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

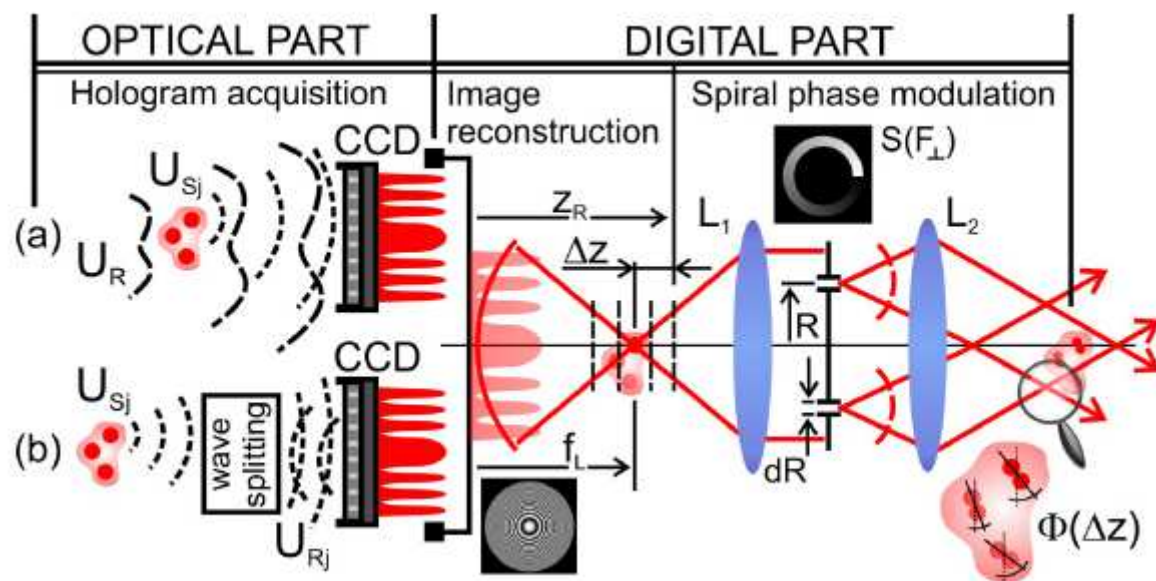
*Petr.Bouchal@ceitec.vutbr.cz

#221096 - \$15.00 USD
(C) 2014 OSA

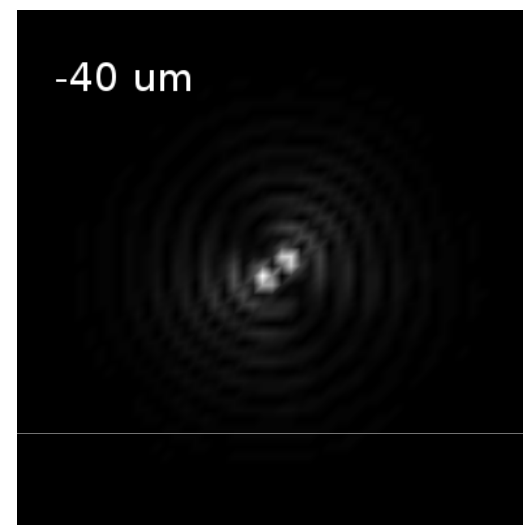
Received 18 Aug 2014; accepted 26 Oct 2014; published 25 Nov 2014
1 December 2014 | Vol. 22, No. 24 | DOI:10.1364/OE.22.030200 | OPTICS EXPRESS 30200

Originalita a výhody návrhu

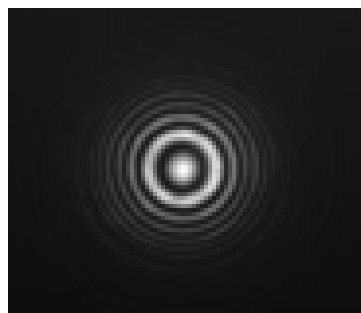
- spojení optické rotace s holografickou rekonstrukcí
- nová metoda rotace pro intenzitní detekci (vírová analogie pro „self-imaging“)
- nová metoda rotace pro elektrickou intenzitu (nedifrakční vírový svazek)
- stabilní profil obrazu (při rozostření rotace bez změny tvaru)
- velký rozsah axiální lokalizace
- vyhodnocení rotace z jediného standardního korelačního záznamu (odpadá „phase shifting“)
- přímé (neiterační) vyhodnocení polohy všech částic z jediné rekonstrukce (možnost sledování pohybu částic)
- vyšší citlivost lokalizace (cca 2x proti jiným metodám dig. mikroskopie)



Experimentální vírová rotace se změnou periody



Experimentální záznam
(rovinná referenční vlna,
 $NA=0.25$, $f_m=400$ mm, $\Delta_2=600$ mm)



Ovládání velikosti
stopy

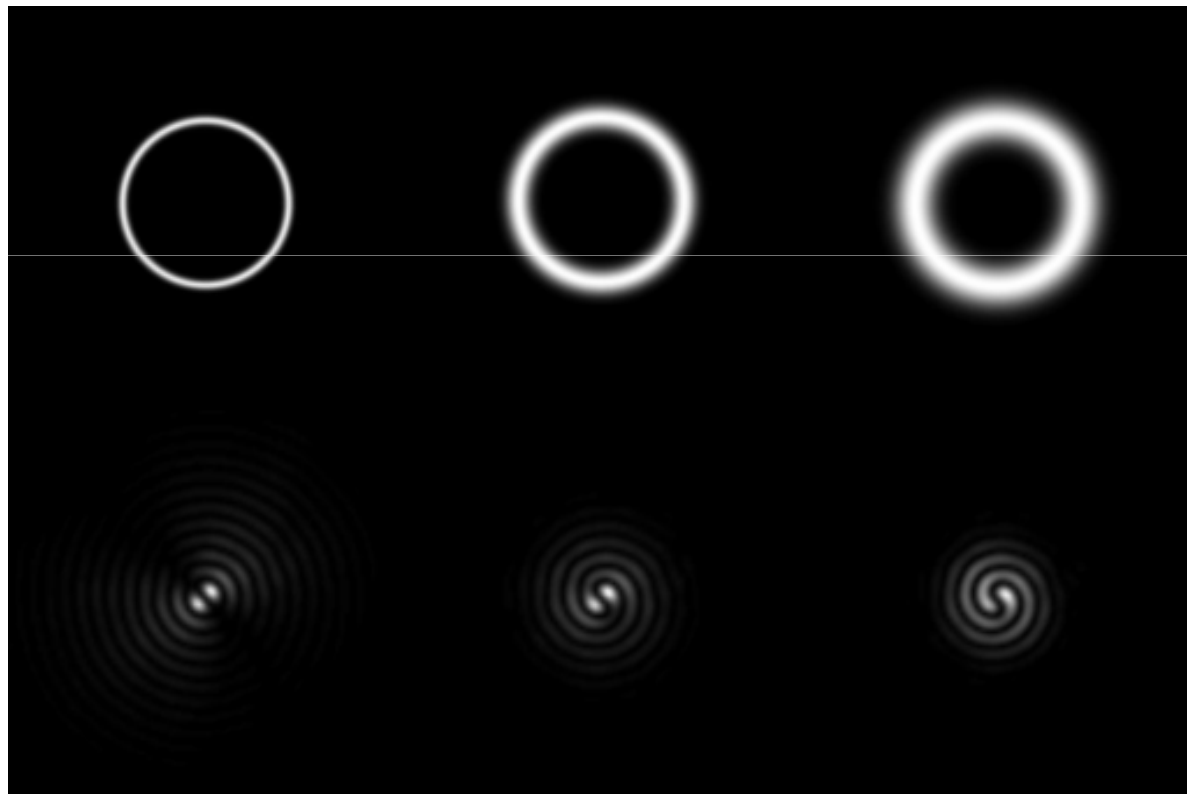
Ovládání rychlosti
rotace

Změna radiální frekvence
vírového filtru

-142.0 um

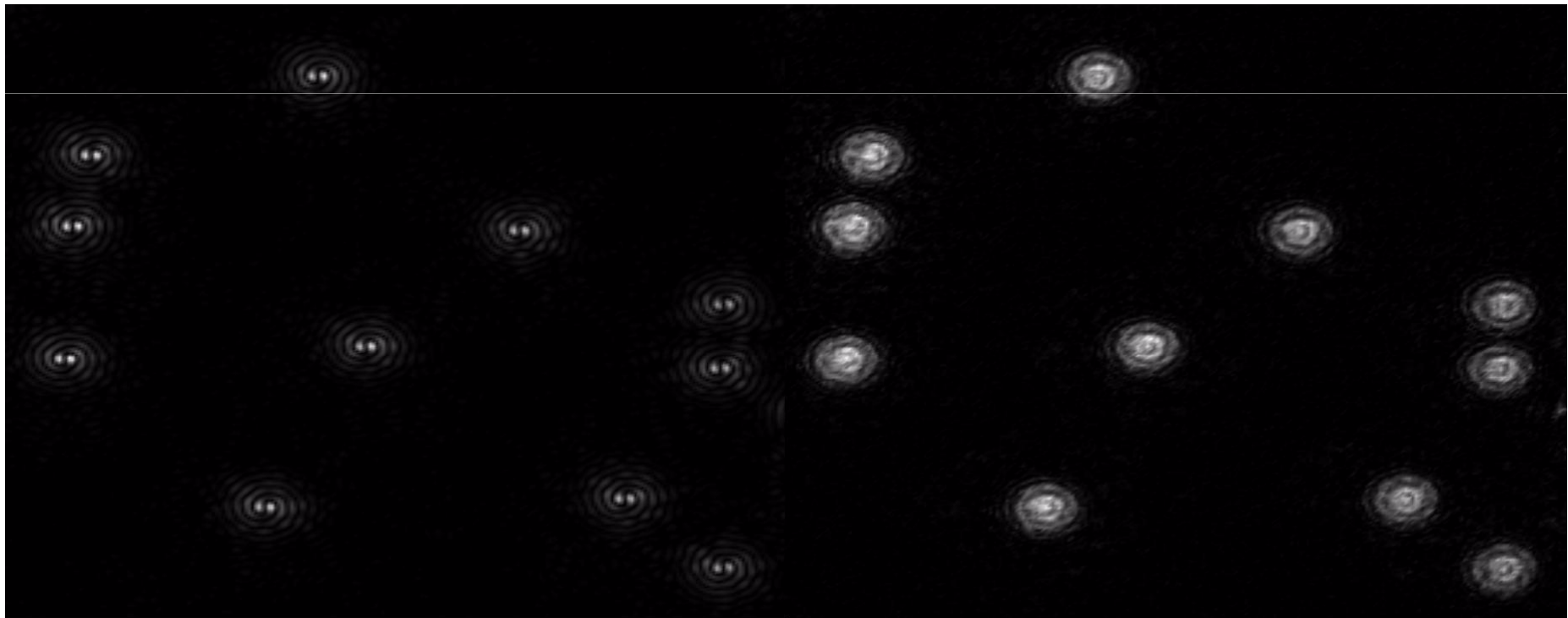
Experimentální vírové rotace se změnou dosahu

Experimentální záznam
(rovinná referenční vlna,
 $NA=0.25$, $f_m=400$ mm, $\Delta_2=600$ mm)

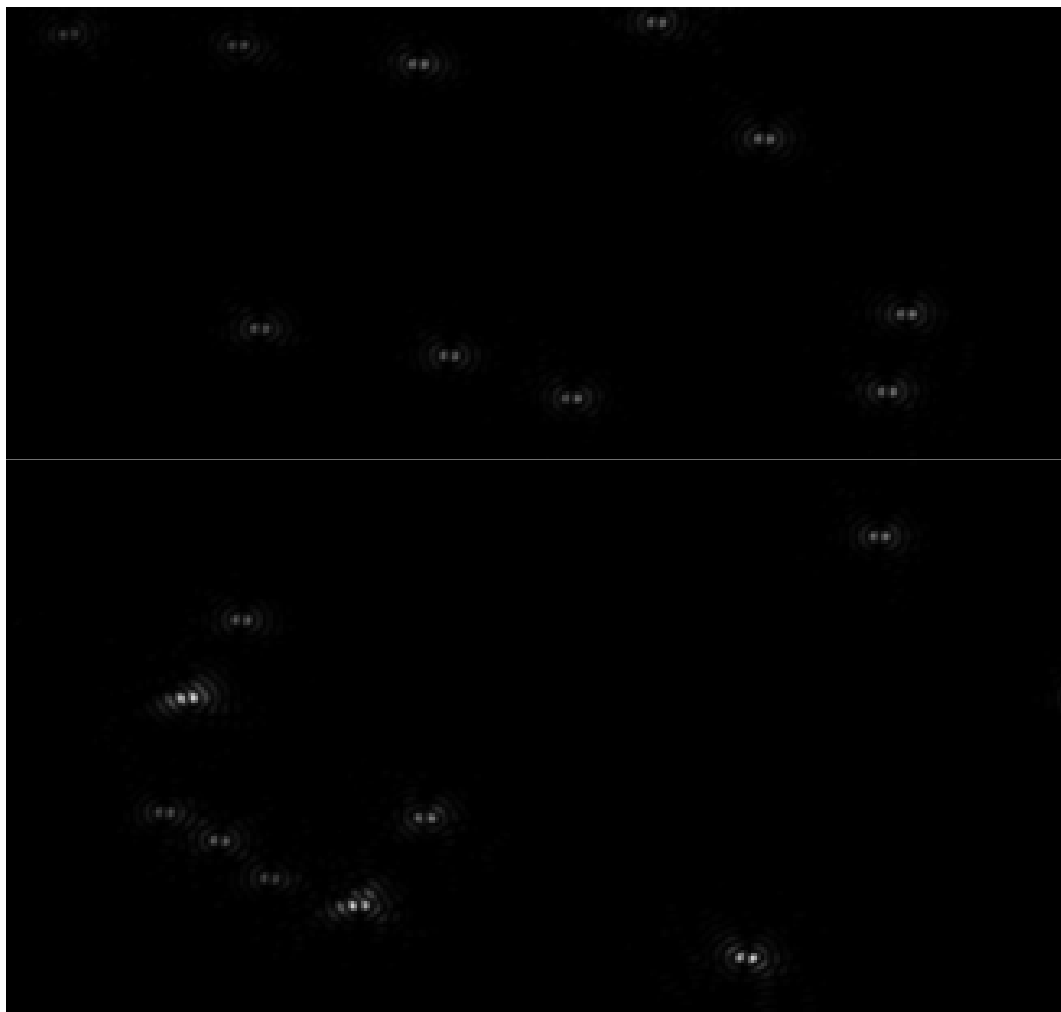


Axiální rotační lokalizace fluorescenčních kuliček

Fluorescenční uspořádání korelačního mikroskopu:
fluorescenční filtry 543 nm / 582 nm, MO NA=0.9,
fixované fluorescenční kuličky Invitrogen 500 nm

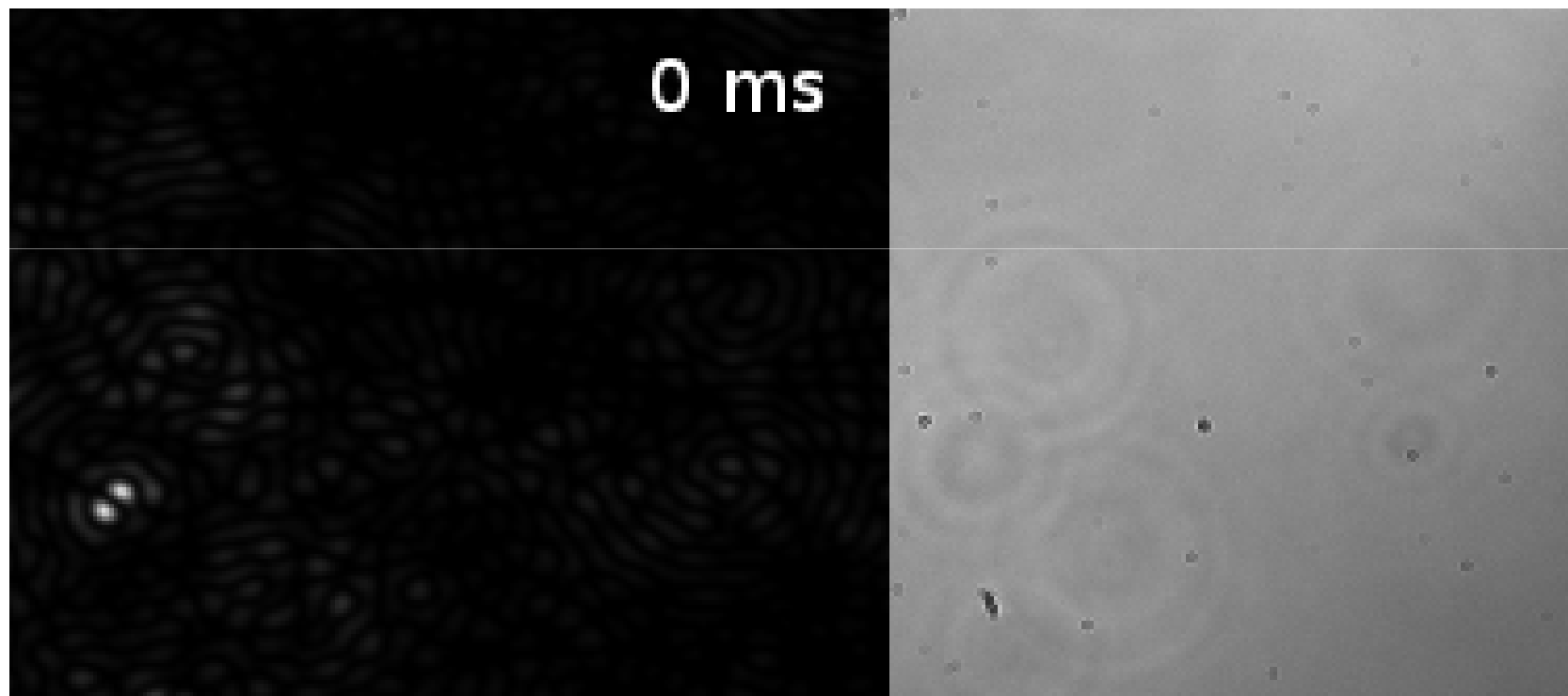


Axiální lokalizace polystyrenových kuliček



Záznam a vírová rekonstrukce polystyrenových kuliček $1\ \mu\text{m}$
(rovinná referenční vlna, $NA=0.25$, $f_m=400\ \text{mm}$, $\Delta_2=600\ \text{mm}$)

Lokalizace pohyblivých polystyrenových kuliček



Podíl na prezentovaných výsledcích

VUT Brno

Petr Bouchal

- návrh nových metod korelačního zobrazení
- návrh a realizace laboratorního korelačního mikroskopu
- princip vírové lokalizace objektů v digitální holografii
 - realizace prezentovaných experimentů

Martin Antoš

- mechanická konstrukce korelačního mikroskopu

Meopta-optika, s.r.o.

- realizace 3 kusů afokálních korektorů disperze PMS (v rámci PB4 CDO TA ČR)

UP Olomouc

Zdeněk Bouchal

- teoretické zázemí experimentů
- výpočetní model pro širokospektrální korelaci
 - koncepční návrh disperzní korekce PMS, spolupráce na ověření funkce korektoru

Vladimír Chlup

- návrh a optimalizace korektoru pro PMS, příprava dokumentace, spolupráce na ověření funkce

Radek Čelechovský

- měření chromatické vady a rozlišení korigovaného PMS

Michal Baránek

- metody rotace obrazu pro optickou mikroskopii

Děkuji za pozornost