

Projekt MPO v programu TANDEM
ev. č. FT-TA2/059

Název projektu: Systémy pro generaci nedifrakčních svazků a přenos
mechanických účinků světla

Nositel projektu: Meopta – optika, s.r.o.

Dokumentace dílčího úkolu I :

Demonstrační jednotka laserové pinzety
s prostorovým modulátorem světla

Řešitelské pracoviště:

Katedra optiky
PřF UP v Olomouci

Obsah:

1. Úvod
2. Princip činnosti dynamické holografické laserové pinzety
3. Základní pracovní jednotky systému
4. Princip prostorové modulace světla a metodika návrhu počítačem generovaných hologramů
5. Návrh základní experimentální sestavy a parametrů optických komponent
6. Základní pracovní funkce laserové pinzety a demonstrace experimentálních výsledků
7. Popis uživatelského software
8. Ovládání programu Camera

Seznam příloh:

Příloha 1

V. Kollárová, Rozměrový návrh pro symetrizaci svazku laserové diody Sony, pracovní seminář projektu, Brno 2005.

Příloha 2

Z. Bouchal, Prostorová modulace světla, pracovní seminář projektu, Olomouc 2005.

Příloha 3

R. Čelechovský, Z. Bouchal, Optické manipulace s využitím prostorového modulátoru světla, pracovní seminář projektu, Olomouc 2006.

Příloha 4

Spatial Light Modulators, Boulder Nonlinear Systems 2007.

1. Úvod

Dílním úkolem, řešeným v rámci projektu FT-TA2/059 na UP v Olomouci, byl návrh a experimentální realizace laserové pinzety, která pracuje v součinnosti s počítačem ovládaným prostorovým modulátorem světla. Smluvně stanoveným výstupem úkolu je demonstrační jednotka, která umožní ověření dynamicky prováděných optických manipulací ovládaných uživatelsky přístupným software. Dokumentace, která byla k této demonstrační jednotce zpracována, informuje o principu činnosti, metodice návrhu, pracovních funkcích a o řídicím software realizované laserové pinzety. Dokumentace je vytvořena jako zpráva, která využívá a komentuje dostupnou odbornou literaturu a podklady vytvořené v průběhu řešení projektu.

2. Princip činnosti dynamické holografické laserové pinzety

Laserová pinzeta je zařízení, které umožňuje zachycení a manipulaci hmotných objektů mikrometrových, případně nanometrových rozměrů pomocí optického záření. Optická past, ve které je částice zachycena, vyžaduje prostorovou lokalizaci elektromagnetické energie v objemu několika kubických mikrometrů. V současné době existuje široká škála systémů, které mají rozdílné principy, technická řešení i možnosti využití (historický vývoj a nové trendy jsou shrnuty v [1]). Podle metod, kterými jsou optické pasti vytvářeny, lze rozlišit několik základních typů laserové pinzety:

- laserová pinzeta s přímou fokusací světla,
- laserová pinzeta s navigací svazku,
- dynamická holografická laserová pinzeta (DHLP).

U laserové pinzety s přímou fokusací světla je optická past vytvořena pomocí laserového svazku s gaussovským profilem intenzity, který je kolimován a následně ostře fokusován mikroskopovým objektivem. Celá setava obvykle odpovídá invertovanému mikroskopu. Takto vytvořená past je statická, přemístění zachycené částice vzhledem k jejímu okolí lze provést posuvem stolku, na kterém je umístěn preparát. U systému s navigací svazku je přemístění zachycené částice realizováno posuvem pasti. Toho je dosaženo skanováním svazku pomocí důmyslných opticko-mechanických nebo elektro-optických systémů. DHLP, jejíž návrh je řešen v rámci projektu, poskytuje zřejmě nejvyšší variabilitu optických manipulací. Pro vytváření optických pastí je v tomto případě využito prostorového modulátoru světla (PMS), který moduluje fázi vstupního laserového svazku. PMS je elektro-optický systém, který je tvořen maticí kapalných krystalů, které mohou lokálně ovlivňovat fázi vstupního záření. Fázové změny jsou realizovány s využitím elektro-optického jevu, který je řízen signálem z počítače. Prostorová struktura fázových změn je určena počítačem generovaným hologramem, který je odeslán na PMS. Použití PMS pro optické manipulace bylo poprvé popsáno v práci [2]. Vzhledem k tomu, že s využitím PMS lze vytvářet v čase proměnné optické pasti pomocí počítačem generovaných hologramů, byl pro tento systém použit název Dynamická Holografická Laserová Pinzeta. Hlavním přínosem DHLP je variabilita pracovních funkcí, které může při optických manipulacích zabezpečit. Jedná se zejména o následující činnosti:

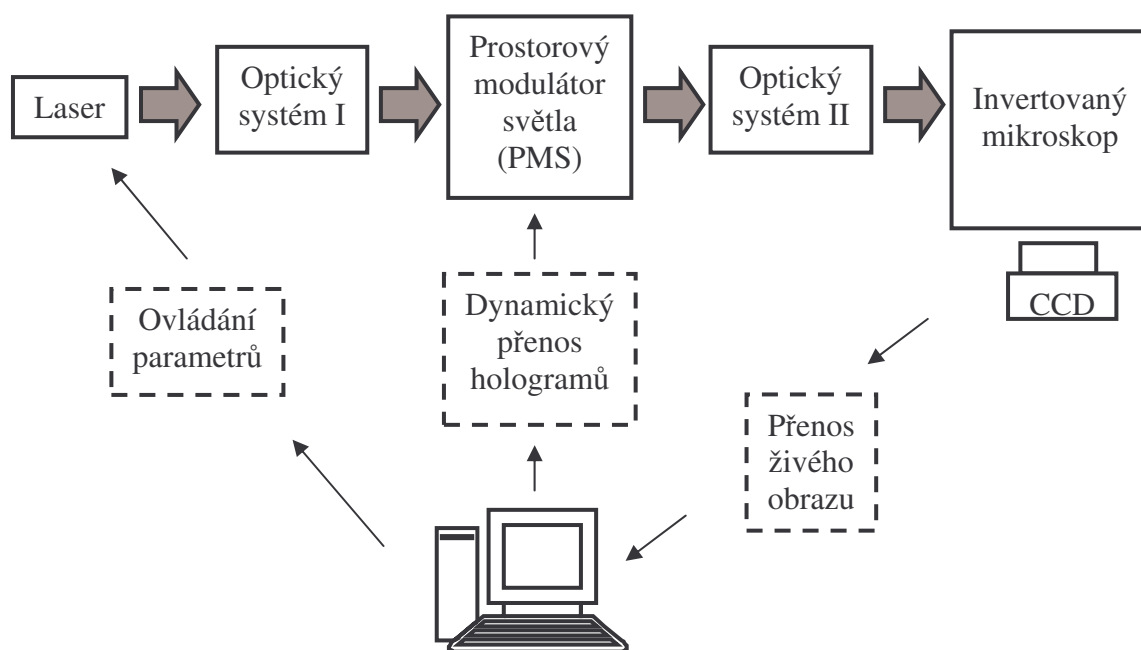
- vytváření jednoduchých pastí cíleně umístěných v 3D prostoru,
- skokové přemísťování (skanování) optické pasti s frekvencí omezenou opakovací frekvencí PMS,
- rozštěpení vstupního svazku do libovolného počtu optických pastí s požadovaným prostorovým rozmístěním (v praxi je počet pastí omezen výkonem svazku),
- spojitě přemísťování zachyceného objektu podél požadované trajektorie,

- možnost nezávislého tvarování jednotlivých optických pastí – mohou vznikat i vírové struktury, které umožňují přenos orbitálního momentu hybnosti.

Nevýhody systému DHLP mají přímou souvislost s použitím PMS:

- poměrně vysoká cena (závisí zejména na typu použitého PMS),
- nízká energetická účinnost (je určena parametry použitého PMS a způsobem vytváření počítačem generovaných hologramů).

Blokové schéma DHLP navržené a realizované v rámci projektu je znázorněno v obr. 1. Laserové zařízení je upraveno optickým systémem I, který provede prostorovou filtraci a kolimaci. Svazek je následně transformován fázovým PMS, na který je z PC odeslán hologram zabezpečující požadované rozložení intenzity ve výstupním svazku. Optickým systémem II se provádí odstranění parazitního světla, které se objevuje v nežádoucích difrakčních řádech vytvořených periodickou strukturou PMS. Svazek je zaveden do invertovaného mikroskopu, který v pracovním vzorku vytváří optickou past jejíž poloha a tvar jsou definovány hologramem vytvořeným na PMS. Živý obraz vzorku vytvořený CCD kamerou je přenesen do PC, kde je překryt transparentním oknem uživatelského software. Toto okno slouží pro zadání parametrů optických pastí, které mají být vytvořeny. Uživatelsky orientovaný software současně slouží i k nastavení parametrů laseru a PMS.



Obr. 1 Blokové schéma dynamické holografické laserové pinzety pracující v součinnosti s fázovým prostorovým modulátorem světla.

3. Základní pracovní jednotky systému

Systém DHLP sestává z několika podsystémů, jejichž činnost a parametry musí být vzájemně přizpůsobeny. Za základní součásti systému lze považovat laser, kolimační optický systém, PMS, 4-f optický systém, invertovaný mikroskop, osvětlovací systém a CCD kameru. Činnost systému dále vyžaduje software pro vytváření fázových hologramů pro PMS a uživatelsky orientovaný software pro řízení pracovních funkcí DHLP a ovládání parametrů laseru, PMS a CCD kamery.

Součásti použité v demonstrační jednotce DHLP:

Laser

Vzhledem k relativně nízké účinnosti PMS je nutné jako zdroj volit laser s dostatečným výkonem. V první etapě řešení projektu, kdy byly prováděny experimenty ověřující funkci PMS byl využíván He-Ne laser (632 nm, 15 mW). V dalších etapách zaměřených na skutečné zachycení a manipulaci mikročástic byl využíván laser Verdi V2 (532 nm, maximální výkon 2 W). Pro plánované experimenty byla výhodná možnost ladění výkonu laseru (u vícenásobných optických pastí musí výkon vstupního svazku narůstat s počtem vytvářených pastí).

Kolimační optický systém (optický systém I)

Svazek vyzářený laserem je nutné prostorově filtrovat a rozšířit tak, aby optimálně zaplnil účinnou plochu PMS. Úprava svazku byla prováděna pomocí kompaktního prostorového filtru Thorlabs, který sestává s mikroobjektivu a výměnné clony umístěné na mikroposuvech. Jako výhodnější způsob prostorové filtrace se osvědčilo navázání laserového svazku do jednomódového vlákna. Ve spolupráci s Meoptou byl řešen osvětlovač, který využívá svazku laserové diody. V tomto případě musí být optický systém navržen tak, aby odstranil elipticitu a astigmatismus svazku. Základní varianty systému byly navrženy na UP v Olomouci. Hlavní výsledky jsou uvedeny v Příloze 1 a diplomové práci [3]. Meopta-optika pak provedla návrh systému optimalizovaný pro součinnost s generátorem nedifrakčních svazků a vyrobila funkční vzorky osvětlovače. Svazek laserové diody symetrizovaný osvětlovačem může být využit i pro osvětlení PMS v systému DHLP.

Fázový prostorový modulátor světla

Klíčovou součástí demonstrační jednotky DHLP je fázový PMS firmy Boulder Nonlinear Systems. Jedná se o reflexní PMS, jehož aktivní plocha obsahuje 512x512 pixelů. Podrobné informace o činnosti systému jsou uvedeny v [4]. Specifikace základních parametrů je v Tab. 1. Z pohledu využití v DHLP je klíčovým parametrem PMS rozteč pixelů, která určuje úhlový odstup jednotlivých difrakčních řádů vytvořených jeho periodickou strukturou. Ta je tvořena transparentními buňkami kapalných krystalů oddělených pro světlo nepropustnými oblastmi. Tato struktura tedy tvoří binární amplitudovou mřížku, na které světlo difrakuje do směrů které jsou vzhledem ke směru dopadající vlny určeny úhly $\Theta_m = m \lambda / \Lambda$, kde $m=0,1,2,\dots$ je difrakční řád, λ je vlnová délka a Λ rozteč pixelů. Tento úhlový odstup vymezuje možnou šířku úhlového spektra optického signálu, který je vytvářen PMS. Úhlová šířka spektra je nepřímo úměrná jemnosti detailů, které signál přenáší. Rozteč pixelů tedy určuje rozlišovací mez optického systému ve kterém je PMS použit. Podrobnější diskuse je v Roční zprávě za rok 2006 a v diplomových pracích [5, 6], které vznikly v souvislosti s řešením projektu. Dalším významným parametrem je difrakční účinnost v nultém řádu, která říká jaké jsou nejmenší možné ztráty výkonu svazku při prostorové modulaci. Ty odpovídají ztrátám vypnutého modulátoru (u použitého fázového PMS je to podle výrobce 61.5 %). Výsledná účinnost je vždy nižší, protože další ztráty vznikají na počítačem generovaném hologramu,

který určuje požadované nastavení změny fáze na jednotlivých pixelech. Velikost ztrát je závislá na typu hologramu. V teoretickém případě ideální blejzované fázové mřížky je její účinnost 100 % a směřuje veškerý světelný výkon do jediného difrakčního řádu (obr. 2a). Způsob přenesení hologramu na PMS ale vede vždy k realizaci stupňovité blejzované mřížky (obr. 2b) jejíž účinnost je nižší a závisí na počtu fázových skoků vytvořených na periodě mřížky. V reálných případech je tak výsledná účinnost fázového PMS přibližně 50 %. Energetická účinnost byla diskutována na pracovních seminářích projektu (Příloha 2 a 3 této zprávy), v práci [7] a podrobněji je rozebrána v diplomové práci [5].

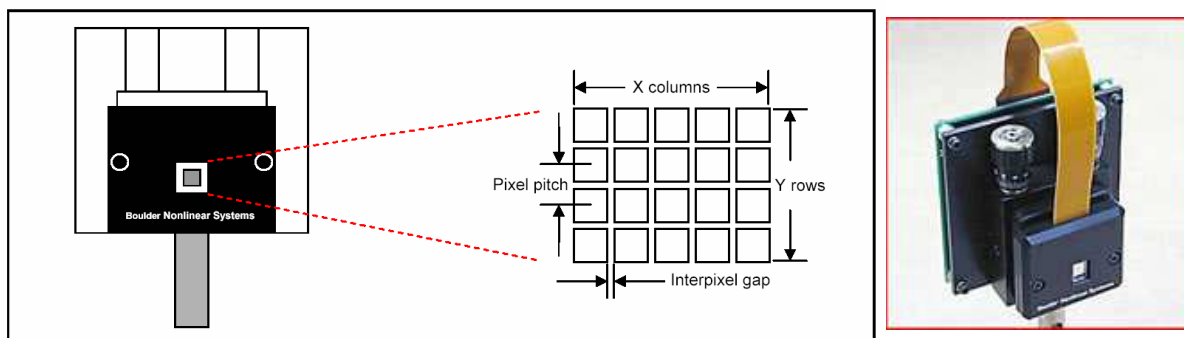
Spatial Light Modulators

XY Phase Series

Specifications (Draft)

	Model P256 – λ (nm)	Model P512 – λ (nm)
Array Size	4.61 x 4.61 mm	7.68 x 7.68 mm
Design Wavelength (nominal)	532, 635, 785, 1064, or 1550 nm (specify wavelength, λ in nm when ordering)	
Diffraction Efficiency (zero-order)	63.9% (maximum)	61.5% (maximum)
Duty Cycle	Up to 100%	
External Window ¹	Broadband antireflection coated for $R_{avg} < 1\%$ (over 450 – 865 nm or 850 – 1650 nm).	
Fill Factor	85.0%	83.4%
Format	256 x 256 (65,536 active pixels)	512 x 512 (262,144 active pixels)
Mode	Reflective	
Modulation	Controllable index of refraction	
Phase Levels (resolvable)	50 linear levels (minimum) for 2π phase stroke	
Phase Stroke (double-pass)	Typically 2π at user-specified laser line	
Pixel Pitch	18 x 18 μm	15 x 15 μm
Reflected Wavefront Distortion (rms) ²	$\lambda/4 - \lambda/10$	$\lambda/3 - \lambda/8$
Response Time ³	33 - 100 ms	33 - 100 ms
Spatial Resolution	27 lp/mm	33 lp/mm
Switching Frequency ³	10 – 30 Hz	10 – 30 Hz

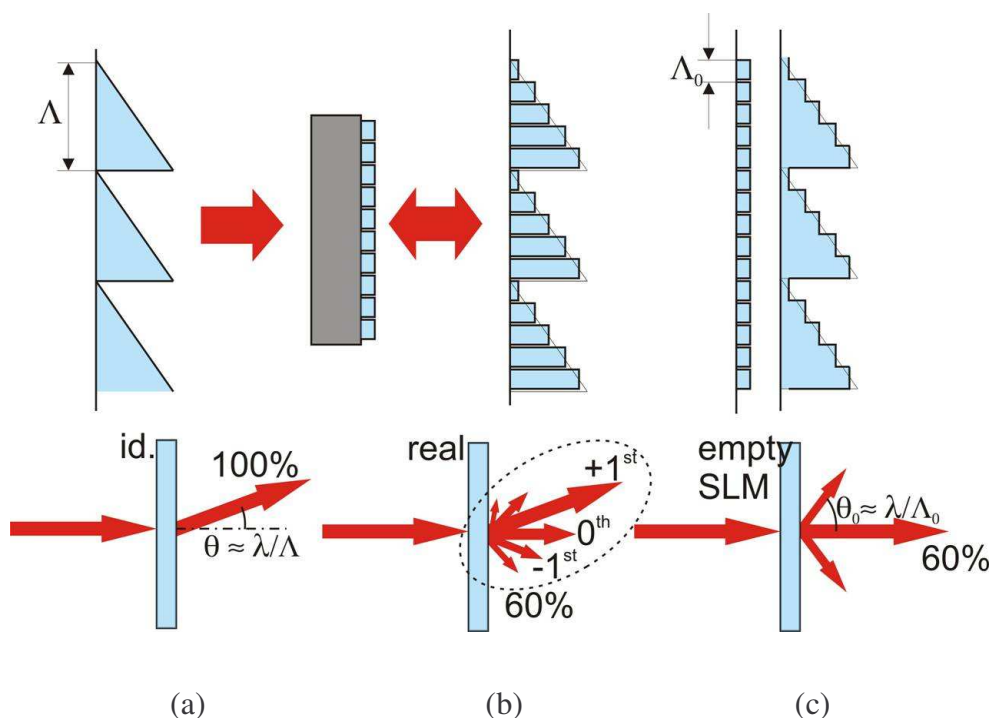
Tab. 1 Parametry fázových PMS firmy Boulder Nonlinear Systems (použitý byl model P512)



Obr. 1 Fázový PMS Boulder 512x512 pixelů.

Dalším významným parametrem PMS je fázový zdvih. Ten je závislý na pracovní vlnové délce a výrobce ho nastavuje podle požadavku uživatele. V případě PMS užívaného na Katedře optiky UP byl nastaven maximální pracovní zdvih 2π pro vlnovou délku He-Ne

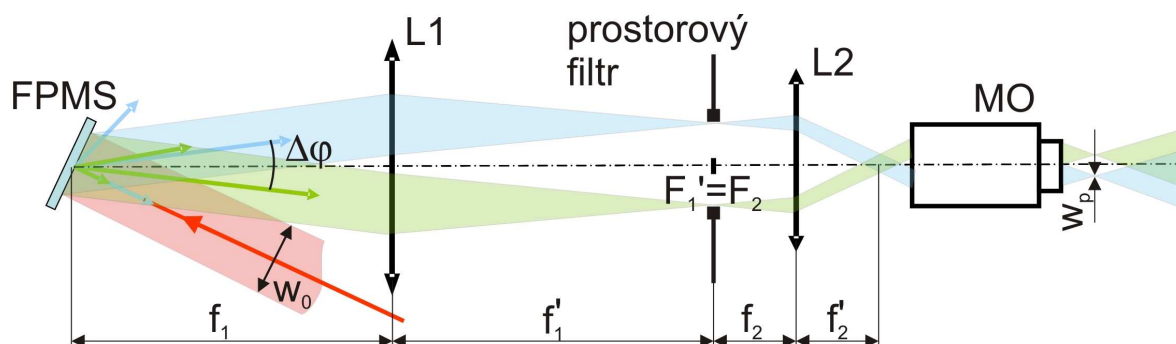
laseru 632 nm. Po zahájení experimentů s laserem Verdi V2 o vlnové délce 532 nm bylo nutné provést kalibraci PMS. Na nastavení maximálního pracovního fázového zdvihu závisí správná funkce a zejména energetická účinnost PMS. Podrobnější analýza vlivu změny fázového zdvihu je v Příloze 2 a 3 a v práci [5].



Obr. 2 Znázornění difrakčních řádů, které vzniknou na: (a) ideální blejzované fázové mřížce, (b) reálné stupňovité blejzované mřížce a (c) struktuře prázdného (vypnutého) modulatoru (odpovídá amplitudové binární mřížce).

Optický systém pro filtraci fázově modulovaného svazku (optický systém II)

Počítačem generovaný hologram přenesený na PMS způsobí požadovanou transformaci vstupního svazku. Současně ale dochází v důsledku difrakce na periodické struktuře k rozložení energie vstupního svazku do vedlejších difrakčních řádů, které se dále nevyužívají a je třeba je odstranit. K tomuto účelu se dá využít 4-f systém, který je znázorněn v obr. 3.



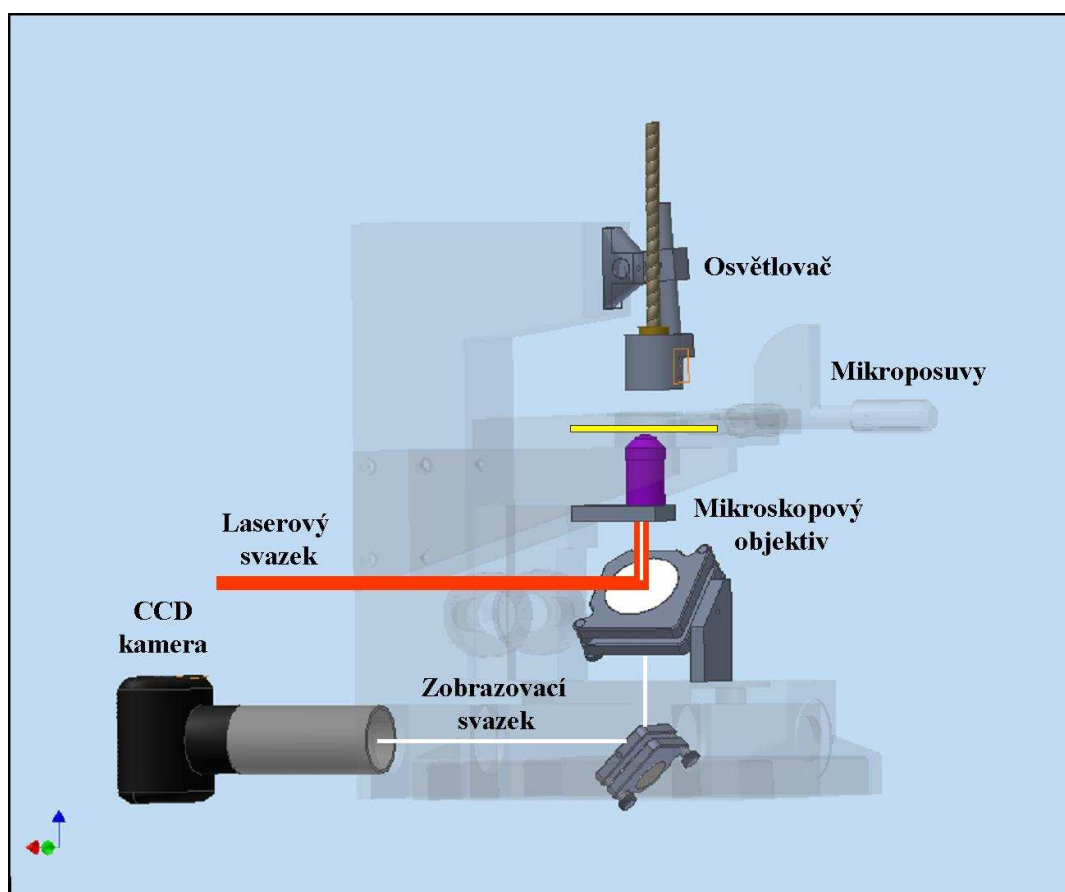
Obr. 3 Telecentrický 4-f optický systém pro filtraci fázově modulovaného laserového svazku.

Jedná se o telecentrický teleskopický systém tvořený čočkami L1 a L2, který kromě prostorové filtrace současně umožní navedení laserových svazků rozmítaných reflexním

fázovým PMS do vstupní pupily mikroskopového objektivu MO. Vstupní laserový svazek je PMS transformován tak, že v ohniskové rovině objektivu L1 umístěného za modulátorem vytváří stopu, jejíž poloha je ve vymezeném zorném poli řízena parametry blejzované fázové mřížky odeslané z PC na PMS. Objektiv L2 směřuje svazek do vstupní pupily mikroskopového objektivu, který vytváří ostře fokusovanou stopu představující optickou past pro zachycení mikročastic. Přemísťování stopy svazku je dosaženo změnou periody Λ a azimutální orientace blejzované fázové mřížky. Pracovní pole ve kterém se optická past může pohybovat má rozměr $\Delta X \times \Delta X$, kde ΔX závisí na rozmítacím úhlu $\Delta\phi$, zvětšení teleskopu Γ a ohniskové vzdálenosti mikroskopového objektivu f'_M , $\Delta X = |\Gamma| f'_M \Delta\phi$, kde $\Gamma = f'_1/f_2$.

Invertovaný mikroskop

Fázově modulovaný svazek je pomocí teleskopu zaveden do invertovaného mikroskopu znázorněného v obr. 4. Svazek je fokusován mikroskopovým objektivem Olympus UPlanFLN 100x1,3 Oil a vytváří ve zkoumaném vzorku optickou past. Do mikroskopového objektivu současně shora vstupuje světlo z osvětlovače, které umožňuje pozorování zachycených objektů na CCD kameře.

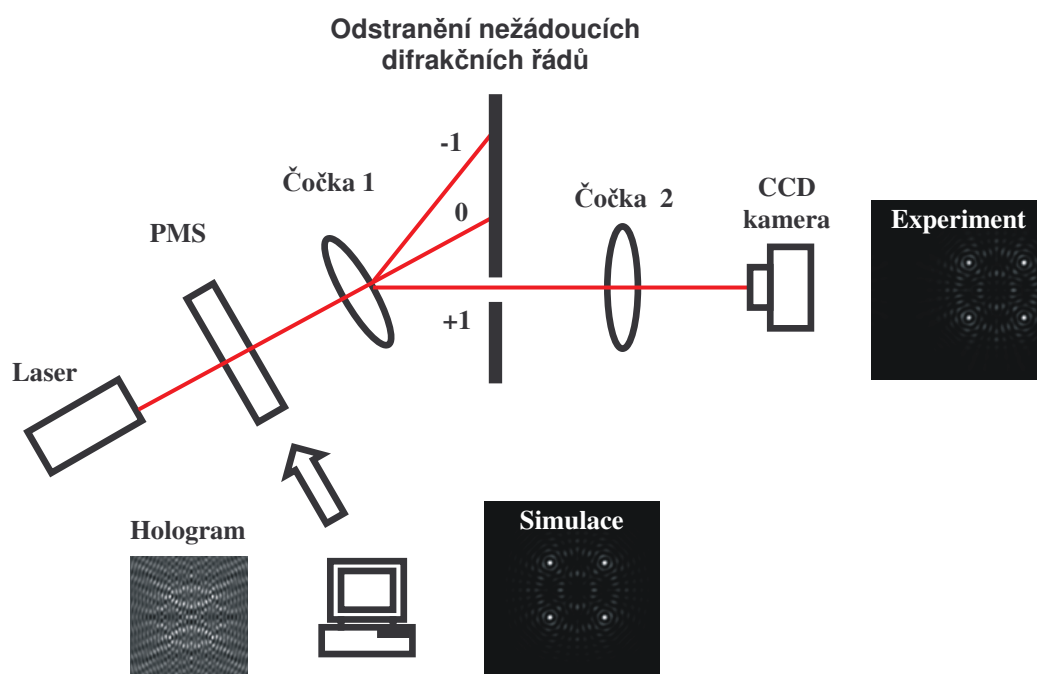


Obr. 4 Schéma invertovaného mikroskopu.

Princip prostorové modulace světla a metodika návrhu počítačem generovaných hologramů

Prostorová modulace je moderní metodou transformace světla, která má značný aplikační potenciál. Provádí se pomocí komerčně dostupných PMS amplitudového nebo fázového typu, jejichž účinná plocha je tvořena maticí elektro-opticky ovládaných kapalných krystalů.

Transformace svazku se provádí tak, že na jednotlivých buňkách (pixelech) se realizují změny indexu lomu, které vedou ke změně amplitudy nebo fáze procházejícího světla. Princip elektro-optického jevu a činnosti PMS je dokumentován v Příloze 3 a podrobně diskutován v [5, 6]. Změny amplitudy a fáze jsou lokální - stav na každém pixelu je přesně definován počítačem generovaným hologramem, který je na PMS odeslán z PC. Tímto způsobem lze tvarovat intenzitní profil (amplitudový PMS) nebo vlnoplochu (fázový PMS) laserového svazku podle předem stanoveného požadavku. Z hlediska energetické účinnosti je výhodné používat fázový PMS. Optické schéma, které lze použít pro ověření činnosti PMS je znázorněno v obr. 5. V PC je provedena numerická simulace požadovaného intenzitního rozložení světla a vypočten odpovídající hologram, který je odeslán na PMS. Hologram představuje datový soubor, který ovládací software PMS převede na příslušné nastavení fázových změn na jednotlivých pixelech. Hologram přenesený na PMS představuje periodickou strukturu, která v reálném případě odesílá světlo do žádoucího, nejčastěji +1. difrakčního řádu ale současně i do vedlejších difrakčních řádů, které je třeba odstranit filtrací v 4-f optickém systému.



Obr. 5 Schéma optického systému pro ověření činnosti prostorového modulátoru světla.

Návrh hologramů pro fázový PMS v obecném případě vyžaduje použití numerických metod založených na iteračních algoritmech. Základní kroky návrhu a přenosu hologramu znázorňuje obr. 6. Nejčastěji užívaným postupem vytvoření základní fázové mapy je Gerchbergův - Saxtonův algoritmus [8].

Iterační proces probíhá tak, že intenzita světelného pole je po přímém šíření nahrazena intenzitou požadovanou a po zpětném šíření intenzitou vstupního svazku. Fáze se postupně upravuje a po N-té iteraci nastává stav, kdy intenzita po přímém šíření s dostatečnou přesností odpovídá intenzitě požadované. Potřebná fázová změna, kterou je třeba provést při modulaci vstupního svazku pomocí PMS pak odpovídá výchozí fázi N-té iterace φ_N . Ve většině praktických případů algoritmus dobře konverguje, typický počet iterací je 10-15. V případě jednoduché optické pasti s proměnnou polohou fázová mapa odpovídá blejzované fázové mřížce s proměnnou periodou a azimutální orientací a může být určena přímým výpočtem. Má-li být energie vstupního svazku rozdělena do vícečetné struktury optických pastí, je modulační funkce určena součtem fázových členů $\Sigma_n \exp(i\varphi_n)$. Tato modulační funkce je tedy komplexní a vyžaduje současnou amplitudovou a fázovou modulaci. Iteračním algoritmem navrženým v [9] může být nahrazena výhodnější modulací čistě fázovou [10]. Fázovou mapu určenou některým z uvedených postupů je nutné následně převést do formátu, který je akceptovatelný PMS. Musí být provedena diskretizace fázové mapy na 256 úrovní v rozmezí hodnot $0-2\pi$. Následně je potřeba vypočtená data linearizovat pomocí kalibrační tabulky. Výsledná matice hodnot (512×512 pixelů, 8 bit) je odeslána pomocí podpůrných funkcí do paměti PMS a zobrazena na jeho pixelové struktuře. PMS umožňuje ve své paměti uchovat 1024 hologramů, které mohou být přepínány s frekvencí přibližně 1 kHz. Tímto způsobem lze vytvářet dynamické fázové masky a realizovat tak časově proměnná optická pole.

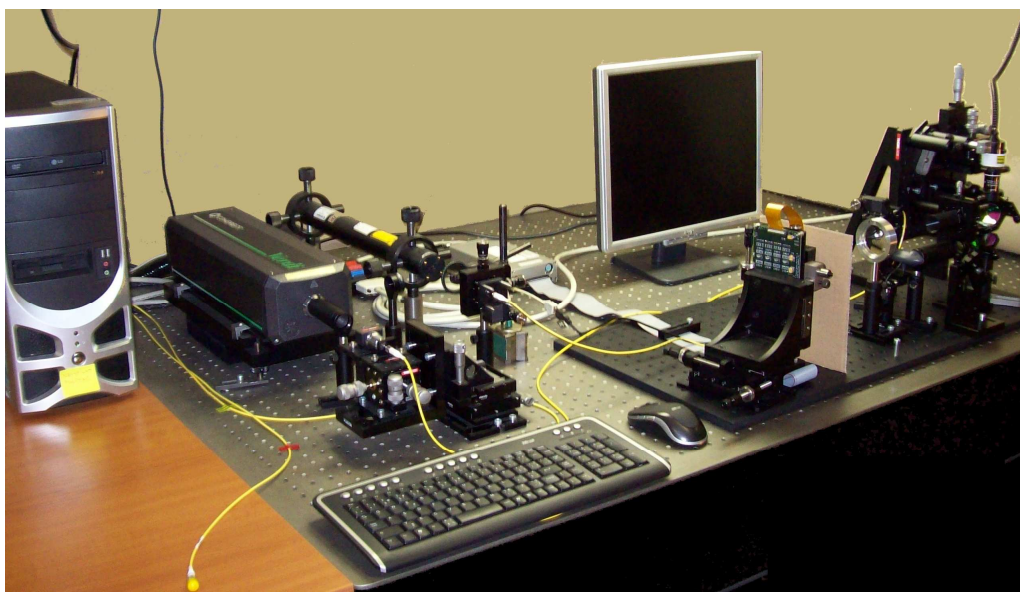
4. Návrh základní experimentální sestavy a parametrů optických komponent

Pro testování DHLP byl použit laser Verdi V2 s vlnovou délkou 532 nm a maximálním výkonem 2 W. Navázání laserového svazku do vlákna (Thorlabs, single-mode, MDF=3.3 μm , NA=0.13) bylo realizováno mikroskopovým objektivem s ohniskovou vzdáleností 9 mm (NewPort 20x, NA=0.4). Vlákno sloužilo k prostorové filtraci svazku a zároveň, ve spojení s kolimátorem na výstupu vlákna, k optimálnímu navedení svazku na PMS. Kolimace svazku na výstupu z vlákna byla provedena jednoduchou čočkou s ohniskovou vzdáleností 50 mm a průměr svazku byl oříznut clonou na velikost PMS. Následně byla nastavena polarizace svazku pro správnou funkci PMS. Byl použit polarizátor (Thorlabs, lin. 10000:1) a půlvlnná fázová destička (Eksma, zero-order). Kolimovaný svazek byl následně po dopadu na reflexní PMS Boulder (512×512 pixelů, $7.68 \times 7.68 \text{ mm}^2$) filtrován 4-f systémem. Pro realizaci teleskopu byly použity čočky s ohniskovými vzdálenostmi 200 mm (průměr 50 mm) a 75 mm (průměr 25.4 mm), prostorový filtr byl realizovaný irisovou clonou umístěnou na posuvech. Filtrovaný svazek za teleskopem byl přiveden do mikroskopového objektivu Olympus UPLFLN 100x, NA=1.3 Oil odrazem přes dichroické zrcátko (Eksma laser-line mirror, 532 nm). Pro osvětlení preparátu byl použit halogenový zdroj, jehož světlo bylo přivedeno světlovodem a upraveno čočkou s ohniskovou vzdáleností 25 mm. Námi použitá tubusová čočka zobrazující obraz mikroskopického preparátu na CCD kameru měla ohniskovou vzdálenost 200 mm. CCD kamera Logitech QuickCam USB má 640×480 pixelů při ploše senzoru $3.7 \times 2.8 \text{ mm}^2$. Při daném zvětšení mikroskopu cca 110x zobrazuje kamera oblast preparátu $34 \times 25 \mu\text{m}^2$. Abychom mohli optickou past přemísťovat po celém zorném poli, rozmítací úhel svazku za PMS musí být alespoň $\pm 0.25^\circ$ (pro úhlopříčku), což představuje blejzovanou mřížku s periodou 0.11 mm (8 pixelů na PMS). Pracovní rozmítací oblast je odkloněna z nultého parazitního řádu PMS o úhel 0.5° podél delší osy, odfiltrování nežádoucích difrakčních řádů je zaručeno. Průměr irisové clony použité ve funkci prostorového filtru je 1.8 mm.

Pro přemísťování jednoduchých i vícenásobných optických pastí bylo vytvořeno uživatelské rozhraní, jehož detailní funkce je popsána v příloze. Všechny parametry programu pro výpočet masek jsou přístupné v Menu programu a lze je nastavovat se změnou experimentu.

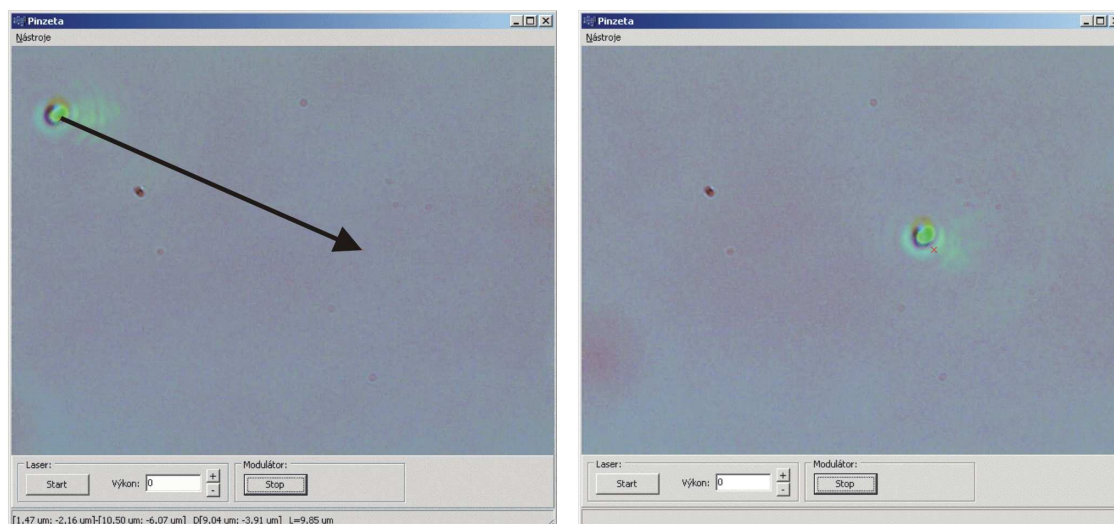
6. Základní pracovní funkce laserové pinzety a demonstrace experimentálních výsledků

Fotografický snímek navrženého a realizovaného systému DHLP je v obr. 8. Jako pracovní zdroj je využíván laser Verdi V2 jehož záření je přivedeno optickým vláknem. Optimalizace činnosti DHLP a ověřování funkce ovládacího software jsou prováděny s využitím He-Ne laseru, jehož záření se dá na modulátor přivést jednoduchou záměnou optického vlákna.



Obr. 8 Fotografický snímek laserové pinzety s prostorovým modulátorem světla.

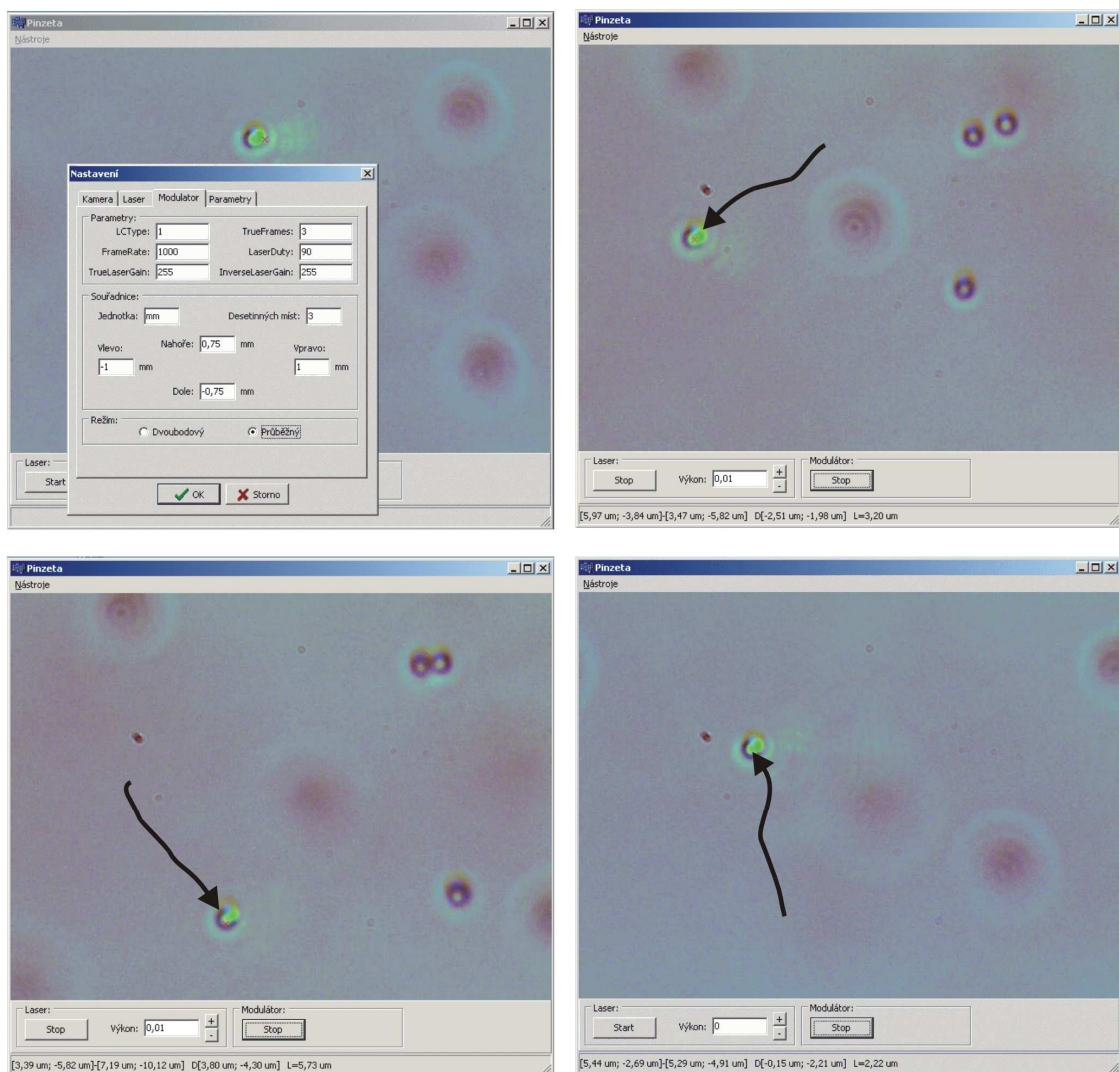
Celý systém byl systematicky testován v laboratoři UP v Olomouci. Pozornost byla zaměřena na spolehlivost součinnosti laserové pinzety s fázovým PMS i na ovládání systému pomocí uživatelského software. Základní pracovní funkce jsou demonstrovány v obr. 9-12. V režimu vytvoření jednoduché pasti je možné provádět její přemístění v reálném čase. Je umožněno v režimu dvoubodovém nebo průběžném. Na obr. 9 je znázorněn režim dvoubodový. Přemístění pasti je určeno počáteční a cílovou polohou, které uživatel definuje pomocí myši. Zachycená částice je následně přesunuta podél přímočaré trajektorie.



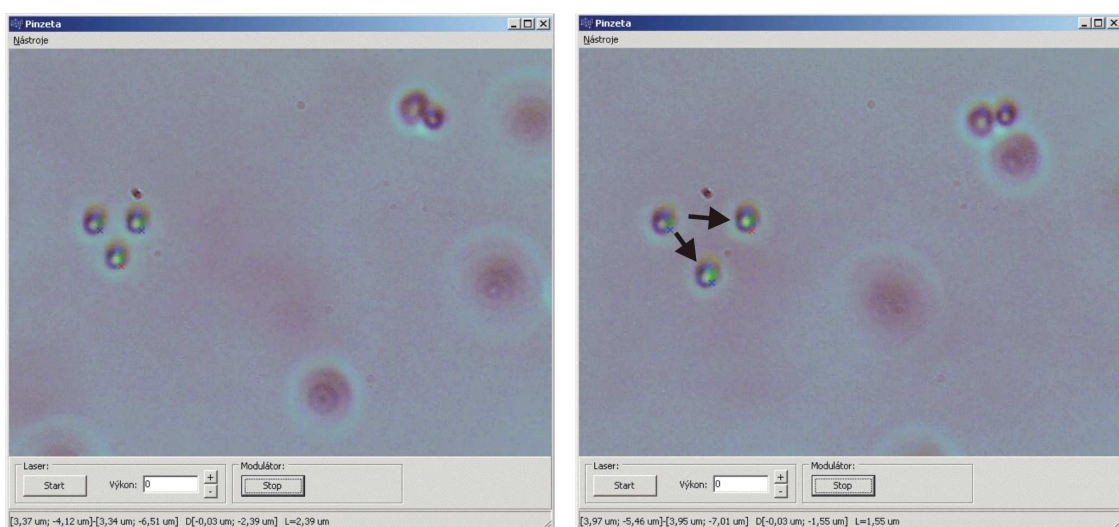
Obr. 9 Demonstrace přemístění částice zachycené v jednoduché pasti v dvoubodovém režimu.

Přemístění jednoduché optické pasti v průběžném režimu ilustruje obr. 10. V tomto režimu zachycená částice následuje v reálném čase myš, která vytváří požadovanou trajektorii přemístění. Série snímků v obr. 10 demonstruje postupné přemísťování polystyrenové kuličky podél tras naznačených šipkami. Systém DHLP umožňuje i vytvoření vícečetných optických pastí (obr. 11). Jejich počet a umístění je ovládáno uživatelem pomocí interaktivního okna řídicího programu. Po vytvoření vícenásobné pasti je možné kteroukoliv ze zachycených částic přemístit podél uživatelem definované trajektorie a to buď v režimu dvoubodovém nebo průběžném.

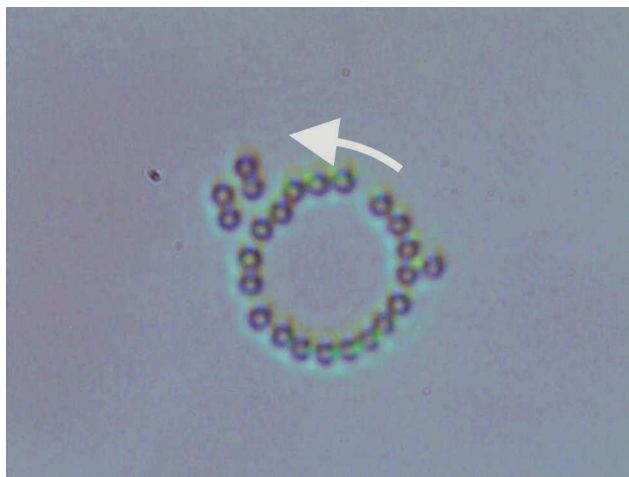
Realizovaná DHLP umožňuje značnou variabilitu optických manipulací. Pomocí fázového PMS je možné provádět i nezávislé tvarování jednotlivých optických pastí. Jednou z perspektivních pracovních funkcí je vytváření vírových optických struktur, které umožňují přenos orbitálního momentu hybnosti na mechanické objekty mikrometrových rozměrů. Tato situace je znázorněna v obr. 12. Vírový svazek má prstencový intenzitní profil ve kterém jsou gradientními silami zachyceny polystyrenové kuličky. Šroubovitá fázová struktura světelného víru způsobuje azimutální víření elektromagnetické energie jehož důsledkem je oběh částic kolem osy svazku ve směru naznačeném šipkou.



Obr. 10 Demonstrace přemístění částice zachycené v jednoduché pasti v průběžném režimu.



Obr. 11 Demonstrace přemístění částic zachycených ve vícenásobné optické pasti.



Obr. 12 Vírová světelná past s prstencovým intenzitním profilem. Částice jsou zachyceny a roztáčeny kolem osy svazku ve směru šipky.

7. Popis uživatelského software

Popis struktury a funkcí programu

Program pro ovládání pinzety je vytvořen jako uživatelsky orientovaná aplikace v programovacím jazyce C++ s využitím prostředí Borland C++ Builder, který je součástí Borland Developer Studia 2006.

Základní činnosti programu jsou orientovány v zásadě do čtyř následujících směrů:

- průběžné snímání živého obrazu preparátu v mikroskopu pomocí standardní Web kamery,
- komunikace s laserem – zapnutí/vypnutí, ovládání výkonu,
- komunikace s modulátorem – zapnutí/vypnutí, konfigurace modulátoru pro vytváření jedné optické pasti nebo souboru vícenásobných optických pastí,
- ovládání režimů posuvu pasti – dvoubodového a průběžného.

Pro snímání obrazu je použita Web kamera Logitech QuickCam s rozhraním USB. Přenos obrazu kamery je realizován s využitím technologie DirectShow, která je součástí systému Windows. Obraz kamery je překryt transparentním oknem, do kterého je vykreslována trajektorie přesunu pasti. Toto překrytí obrazu kamery transparentním oknem zprostředkovává interface IVideoMixingRenderer9. Lze ovládat a definovat základní parametry kamery, jako jsou definice driveru, rozlišení kamery, definice souřadnic obrazu kamery a základní charakteristiky transparentního okna.

Komunikace uživatelského rozhraní s laserem probíhá pomocí standardní sériové linky. Tato komunikace pracuje v samostatném procesu, takže nebrzdí uživatelské rozhraní. Komunikace s laserem obsahuje zapínání/vypínání laseru a nastavení jeho výkonu.

Rozhraní modulátoru je řešeno prostřednictvím dodané knihovny BNS SDK. Pro příslušnou pozici pasti v obraze preparátu je vypočítána maska modulátoru, která je následně po načtení do modulátoru aktivována. Krok posuvu pasti je nastavitelný. V programu je integrováno ovládání parametrů modulátoru.

Pro vlastní posuv pasti je možno využít jeden ze dvou vytvořených režimů. První z nich, označený jako dvoubodový, spočívá v definici počátečního a koncového bodu, které tak určují lineární trajektorii. Pro jednotlivé body této trajektorie, definované nastavitelným krokem posuvu pasti, se počítají masky modulátoru, uloží se do modulátoru a teprve následně se provede jejich „animace“. Druhý režim, označený jako průběžný, sleduje pohyb kurzoru

myši, masky v bodech trajektorie, jejichž rozteč je opět definována krokem posunu pasti, se vypočítávají průběžně a aktivují se ihned po vložení do modulátoru.

8. Ovládání programu Camera

Spuštění programu

Činnost laserové pinzety, která spolupracuje s prostorovým modulátorem světla, je řízena uživatelsky orientovaným programem Camera. Spouštěcí soubor s názvem Camera.exe se nachází v adresáři C:\ \Camera\bin, kde C je označení jednotky, na níž je program instalován. Po spuštění se objeví hlavní okno aplikace (obr. 9), jehož hlavní část zaujímá obraz preparátu, snímáný CCD kamerou, a ve spodní části okna jsou dvě tlačítka – jedno pro spuštění a vypnutí laseru, druhé pro spuštění a vypnutí modulátoru. Při zapnutém laseru je možné ovládat jeho výkon v editačním okně vedle tlačítka Start laseru.

Při prvním použití programu je nutno načíst driver kamery – viz položka hlavní nabídky Nástroje->Připojit driver. Vybírá se ze seznamu driverů, které lze nalézt na daném počítači. Pro další práci s programem je nutno zajistit spuštění laseru (může být spuštěn přímo z ovládacího zařízení laseru, bez použití ovládání laseru programem) a modulátoru.

Ovládání pastí

Je možné vytvořit a dále pracovat se dvěma druhy pastí – s pastí dynamickou a pastmi statickými. Pasti je možno přemísťovat. V tzv. dvoubodovém režimu se past přemísťuje po lineární trajektorii, která se zároveň vykresluje. V průběžném režimu se past přemísťuje po libovolné trajektorii. Režim přesunu pasti je nastavitelný.

Past dynamická se vytváří kliknutím na libovolné tlačítko myši. Past se vytvoří na pozici kurzoru. Dynamická past je v původním nastavení programu označena červeným křížkem (barva označení pasti je nastavitelná).

Přemístění dynamické pasti:

- Kliknutím na libovolné tlačítko myši na jiné pozici kurzoru myši v oblasti preparátu. Past na původním místě se zruší a vytvoří se nová past na nové pozici kurzoru.
- Kliknutím na libovolné tlačítko myši a tažením myši při stisknutém tlačítku. Počátek trajektorie přesunu pasti je možno volit i mimo prostor pastí.

Past statická se vytváří použitím kombinace klávesy Ctrl a klikem na libovolné tlačítko myši. Opakovaným použitím této kombinace na jiné pozici kurzoru se vytvoří nová statická past – je tedy možno v oblasti preparátu vytvářet prakticky neomezený počet statických pastí. Statická past se ruší kombinací klávesy Alt a klikem na libovolné tlačítko myši na pozici statické pasti. Statická past je v původním nastavení programu označena modrým křížkem (barva označení statické pasti je opět nastavitelná).

Přesun statické pasti se provádí tažením myši (kliknutí na pozici kurzoru a přesun myši při stlačení tlačítka) za křížek označení statické pasti.

Nastavení programu

Nastavení programu se provádí z hlavní nabídky Nástroje->Nastavení. Jsou k dispozici čtyři karty:

Karta Kamera

V boxu Driver se vybírá driver CCD kamery a nastavuje požadované rozlišení. V původním nastavení programu se automaticky volí maximální rozlišení kamery.

Nastavení

Kamera Laser Modulator Parametry

Driver:
Driver:
Rozlišení: 640 x 480

Souřadnice:
Jednotka: Desetinných míst:
Vlevo: Nahoře: 12,2 Vpravo:
0 Dole: 0

Zobrazení a barvy:
Průhlednost:
Dočasná past: Trajektorie:
Trvalé pasti:

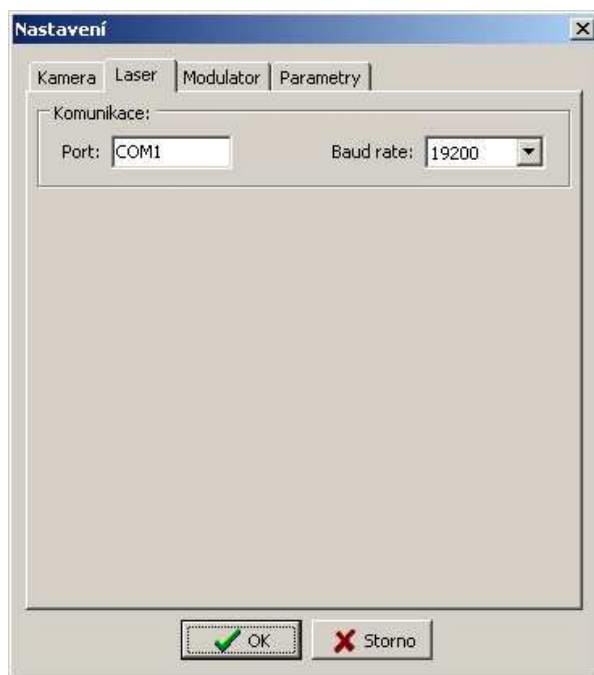
OK Storno

V boxu souřadnice se definují souřadnice zobrazené oblasti preparátu. Zadává se poloha levého dolního a pravého horního rohu požadované oblasti ve zvolených jednotkách (editační okno Jednotka). Přesnost zadávaných souřadnic je definována v editačním okně Desetinných míst.

V posledním boxu Zobrazení a barvy se volí Stupeň průhlednosti okna, které překrývá preparát a ve kterém se provádí všechna vykreslování programem. Průhlednost okna se volí posuvníkem Průhlednost. Dále je možno volit barvy pro vykreslování lineární trajektorie (pole Trajektorie) a barvy křížků pro označení Statické a dynamické pasti (pole Trvalé pasti a Dočasná past). Kliknutím myši na barevná pole se zobrazí Windows dialog pro volbu barev.

Karta Laser

Zadávají se dva údaje sdružené v boxu Komunikace. Volí se sériový port, přes která je ovládání laseru připojeno (editační okno Port) a rychlost komunikace (editační okno Baud rate).

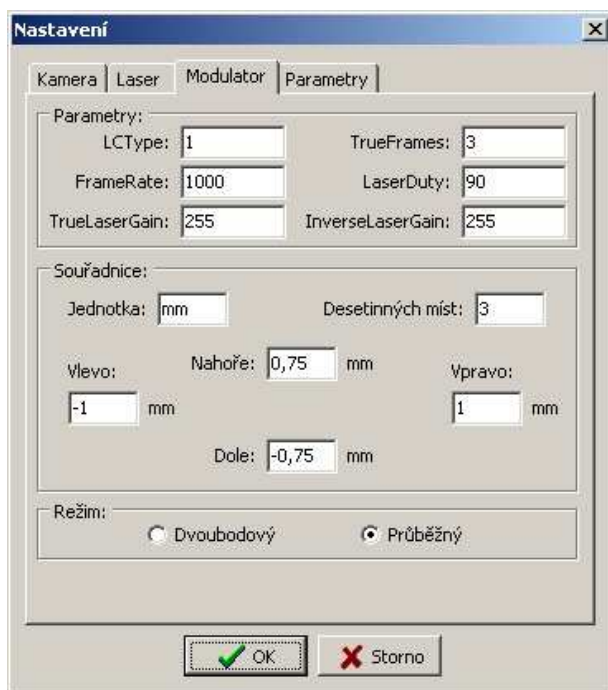


Karta Modulátor

Data v boxu Parametry doporučujeme neměnit, jsou dány reálnými parametry použitého modulátoru.

V boxu Souřadnice se definuje velikost fiktivní oblasti pro výpočet pro výpočet masek modulátoru. Pomocí definice této oblasti se synchronizuje modulátor s velikostí reálného preparátu. Nastavení závisí na parametrech optických soustav zařízení pinzety. Běžnému uživateli se nedoporučuje hodnoty v tomto boxu měnit.

V dolní boxu Režim se volí režim posunu pasti – dvoubodový nebo průběžný. Změna se provádí označením příslušného režimu myší.



Karta Parametry

Doporučují se pokud možno minimální zásahy v boxu Parametry masky. V editačních oknech se zde zadávají parametry jako jsou vlnová délka použitého laseru, hodnoty zvětšení v osách x a z (položky Mx, My), jejichž hodnoty souvisí se zadanými souřadnicemi v boxu Souřadnice na kartě Modulátor, X odklon a Y odklon definují difrakční řád pracovní oblasti modulátoru. Položky Transponování, Zrcadlení X a Zrcadlení Y zajišťují korespondující matematické operace s maticí masky modulátoru. Linearizační tabulka je definována použitým modulátorem.

The screenshot shows a software window titled "Nastavení" with a tabbed interface. The "Parametry" tab is active. It contains two main sections: "Parametry masky" and "Parametry přesunu". The "Parametry masky" section has input fields for "Vlnová délka" (0,000532), "Mx" (0,2), "My" (0,2), "X odklon" (-0,5), and "Y odklon" (0). Below these are three checkboxes: "Transponování", "Zrcadlení X", and "Zrcadlení Y", all of which are currently unchecked. A file path for "Linearizační tabulka" is displayed as "C:\Blink\LUT_Files\slm532.lut". The "Parametry přesunu" section has input fields for "Délka kroku" (0,3 um), "Prodleva mezi kroky" (20 ms), and "Prodleva mezi přepínáním masky" (4 ms). At the bottom of the window are two buttons: "OK" and "Storno".

V boxu Parametry přesunu se v příslušných editačních oknech volí délka kroku posunu pasti po zvolené trajektorii (okno Délka kroku), časová prodleva mezi kroky posunu pasti (okno Prodleva mezi kroky) a v okně Prodleva mezi přepínáním masky se zadává časový údaj, potřebný k zajištění stability programu. Tyto údaje může zadávat běžný uživatel, může být prospěšné odzkoušet několik hodnot při konkrétní práci s preparátem.

Literatura

1. P. Zemánek, P. Jákl, J. Ježek, M. Šerý, V. Karásek, T. Čížmár a M. Šiler, Laboratoř optických mikromanipulačních technik ÚPT AV ČR, JMO 1, 7 (2006).
2. J. E. Curtis, B. A. Koss, and D. G. Grier, Dynamic holographic optical tweezer, Opt. Commun. 207, 169 (2002).
3. J. Květoň, Experimentální realizace symetrizace svazku laserové diody, Diplomová práce UP Olomouc (2007).
4. <http://www.bnonlinear.com/>.
5. Z. Doležel, Teoretické a experimentální posouzení energetické účinnosti prostorových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007).
6. F. Chlup, Metody pro ovládání amplitudových a fázových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007).

7. Z. Bouchal., R. Čelechovský, G. Swartzlander, Jr., Spatially Localized Vortex Structures, Monograph Localized Waves, Edited by H. E. Hernández-Figueroa, M. Zamboni-Rached and E. Recami, J. Wiley & Sons (2008) (ISBN: 978-0-470-10885-7).
8. R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures, *Optik* 35, 237 (1972).
9. J. Lin, X. C. Yuan, S. H. Tao, and R. E. Burge, Collinear superposition of multiple helical beams generated by a single azimuthally modulated phase-only element, *Opt. Lett.* 30, 3266-8 (2005).
10. R. Čelechovský, Z. Bouchal, Optical implementation of the vortex information channel, *New J. Phys.* 9, 1367 (2007).