

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 II :

Demonstrační jednotka
generátoru nedifrakčních svazků

Řešitelská pracoviště:

Katedra optiky
PřF UP v Olomouci

Meopta – optika, s.r.o.

Obsah:

1. Úvod
2. Princip činnosti generátoru nedifrakčních svazků
3. Návrh a realizace
4. Svazkový generátor v systému pro optické manipulace
5. Demonstrace experimentálních výsledků

Přílohy:

Příloha 1

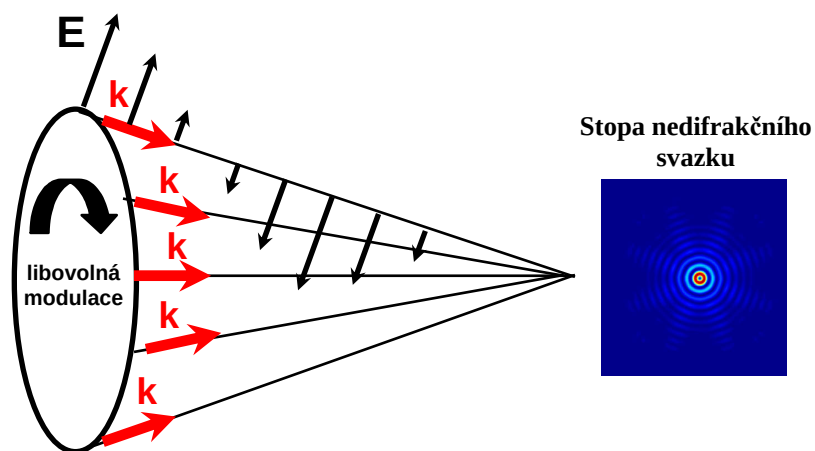
V. Kollárová, T. Medřík, R. Čelechovský, V. Chlup, Z. Bouchal, A. Pochylý, M. Kalman, T. Kubina, Optically adjustable light filaments generated by a compact laser convertor, Opt. Exp. (submitted).

1. Úvod

Dílčí úkol, který v rámci projektu FT-TA2/059 řešila UP v Olomouci ve spolupráci s Meoptou - optika, byl zaměřen na návrh, experimentální ověření a následnou realizaci generátoru nedifrakčních svazků (GNS). Jedná se o kompaktní opticko-mechanický systém, který umožňuje transformaci gaussovského laserového svazku na nedifrakční svazekesselovského typu s možností plynulého příčného přemístění stopy svazku. Smluvně stanoveným výstupem úkolu je jednotka, která umožní demonstraci činnosti GNS a ověří možnost jeho použití při navigaci svazku v laserové pinzetě. Dokumentace k této demonstrační jednotce je vytvořena jako zpráva, která poskytuje popis principu činnosti a návrhu GNS a obsahuje potřebnou dokumentaci pro realizaci.

2. Princip činnosti generátoru nedifrakčních svazků

Návrh systému GNS vychází z teoretických a experimentálních poznatků nedifrakčního šíření světla. Pojem nedifrakční svazek byl zaveden Durninem [1] a je běžně užíván v optice i akustice přestože jeho význam je pouze teoretický. V nejjednodušší představě může být nedifrakční svazek chápán jako interferenční pole rovinných vln jejichž směry šíření jsou vybrány tak aby průmět vlnových vektorů do směru osy svazku měl stejnou velikost. Z geometrického hlediska to odpovídá situaci, kdy vlnové vektory vytvářejí kuželovou plochu (obr. 1).

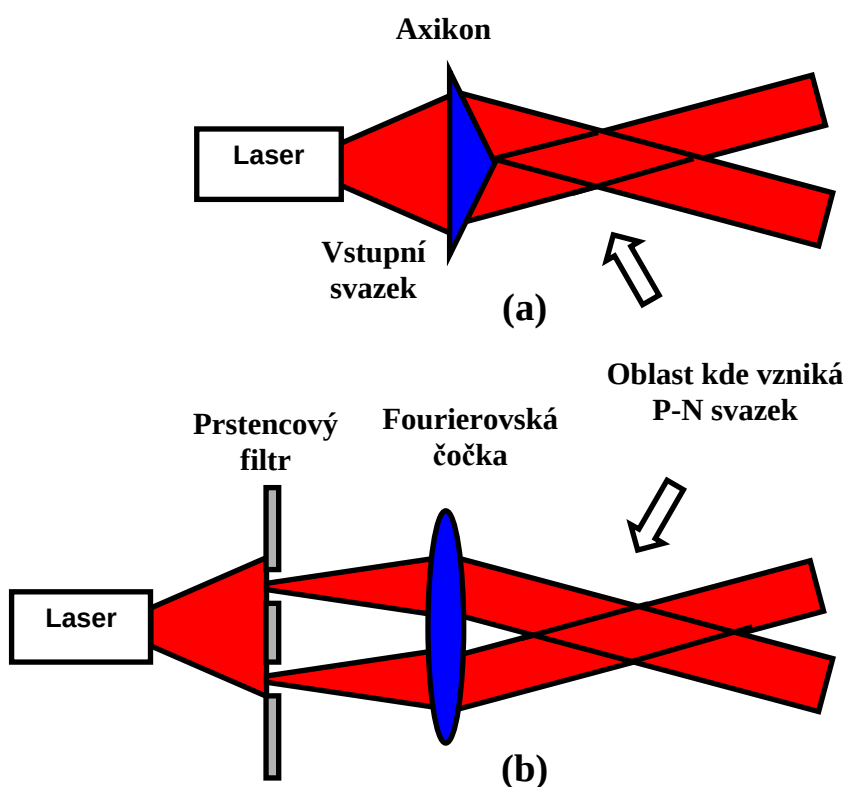


Obr. 1 Znárodnění nedifrakčního svazku jako interferenčního pole rovinných vln jejichž vzájemný fázový rozdíl se nemění při šíření (vlnové vektory vytvářejí kuželovou plochu).

Interferencí neomezených rovinných vln s takto omezenými směry šíření vzniká interferenční pole, které má charakter svazku, jehož příčný intenzitní profil je neměnný. Velikost stopy svazku je jednoznačně svázána s vrcholovým úhlem kuželové plochy, rozdělení intenzity ve stopě svazku závisí na amplitudě a počáteční fázi jednotlivých interferujících vln. V případě, že amplituda i fáze všech rovinných vln je konstantní, intenzitní profil vytvořeného svazku je popsán Besselovou funkcí prvního druhu a nultého řádu J_0 (besselovský svazek).

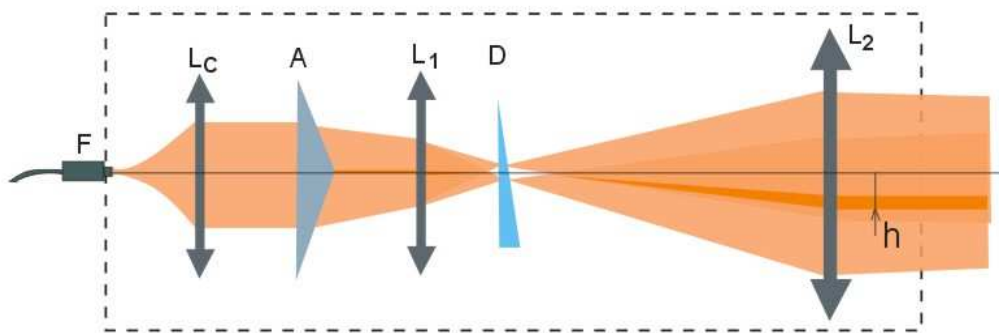
Amplitudová a fázová modulační interferujících rovinných vln dává značnou variabilitu intenzitních profilů nedifrakčních svazků. Vzhledem k tomu, že jediným omezením pro modulační funkci je její úhlová periodicitu, je možné tímto způsobem vytvořit

nekonečný počet nedifrakčních svazků s odlišným intenzitním profilem. V dobrém přiblížení je možné vytvořit svazek s prakticky libovolným, předem určeným intenzitním profilem [2, 3]. V konstrukci GNS je využita lineární fázová modulace rovinných vln, která při jejich interferenci vede k příčnému izoplanatickému přemístění stopy svazku při zachování původního směru šíření [4]. Rovinné vlny jsou nekonečně rozlehlé, takže oblast kde interferují je rovněž nekonečná. Tato situace neodpovídá fyzikální realitě, protože takto vytvořený svazek by musel nést nekonečné množství energie. Pro experimenty je důležitý model, který předpokládá, že ideální nedifrakční svazek je příčně omezený kvadraticky integrabilní obálkou (nejčastěji gaussovského tvaru). Takto vytvořený svazek má konečnou energii a dává dobrou představu o vlastnostech svazku, který lze experimentálně realizovat. V optické terminologii je nazýván svazkem pseudo-nedifrakčním (P-N). Svazek tohoto typu je možné získat několika způsoby. Nejjednodušší a nejnázornější experimenty jsou založeny na použití axikonu (obr. 2a) nebo prstencového filtru (obr. 2b).



Obr. 2 Demonstrace principu vytvoření pseudo-nedifrakčního svazku pomocí (a) axikonu a (b) prstencového filtru.

Svazek vzniká v interferenční oblasti jejíž délku je možné měnit příčným rozměrem axikonu nebo čočky. V celé interferenční oblasti zachovává vytvořený P-N svazek svůj profil a dobře aproximuje ideální nedifrakční svazek. Velikost stopy je určena sklonem interferujících svazků. Z toho plyne pro aplikace velmi významná vlastnost – délku oblasti, ve které svazek zachovává svůj příčný profil (jak z hlediska tvaru, tak i velikosti) můžeme v experimentu podle potřeby měnit. Stačí k tomu změna příčného rozměru použitých optických elementů. S použitím dostupných optických elementů je tak možné vytvořit miniaturní svazek s příčným rozměrem několika mikrometrů a extrémně velkou délkou dosahu více než deseti milimetrů. Princip činnosti GNS, který byl realizován při řešení projektu, vychází z optického schématu v obr. 3.



Obr. 3 Optické schéma pro demonstraci principu činnosti generátoru nedifrakčních svazků (F – optické vlákno případně adaptér pro symetrizaci svazku laserové diody, L_c – kolimační čočka, A – axikon, L_1 , L_2 – čočky teleskopu, D - diasporametr).

Tento systém ze vstupního záření, které je přivedeno vláknovým osvětlovačem nebo systémem pro úpravu svazku laserové diody, vytváří P-N svazek besselovského-gaussovského typu s možností příčného přemístění stopy. Požadovaný svazek je vytvářen ve dvou stupních, které využívají metod demonstrovaných v obr. 2a a 2b. V prvním stupni je kolimovaný svazek převeden na P-N svazek pomocí axikonu. Výhodou tohoto postupu je především dobrá energetická účinnost. Následný teleskop vykonává funkci 4-F optického systému. První člen L_1 provádí Fourierovu transformaci a vytváří ve své ohniskové rovině prostorové spektrum, které má v případě P-N svazku tvar úzkého mezikruží.

Členem L_2 je provedena inverzní Fourierova transformace jejímž výsledkem je opět P-N svazek. Transformace provedená teleskopem má dvojí význam. Jednak dochází k přeškálování stopy a dosahu vstupního svazku a jednak je v obrazové ohniskové rovině provedena fázová modulace prostorového spektra, která umožní nastavení polohy stopy svazku do libovolně pozice vymezeného pole. Požadovaná fázová modulace je principiálně realizovatelná pomocí optické klínu s proměnným vrcholovým úhlem a s možností jeho otáčení kolem optické osy systému. V navrženém systému tuto funkci vykonává diasporametr. Princip přemístění stopy svazku byl popsán v práci [4], podrobný popis celého experimentu je proveden v rukopisu článku, který je v Příloze 1.

3. Návrh a realizace generátoru nedifrakčních svazků

GNS je složen ze tří funkčních bloků, jejichž návrh bylo možné provést odděleně. Jedná se o následující bloky:

- osvětlovací systém,
- optický systém pro vytvoření nedifrakčního svazku,
- diasporametr.

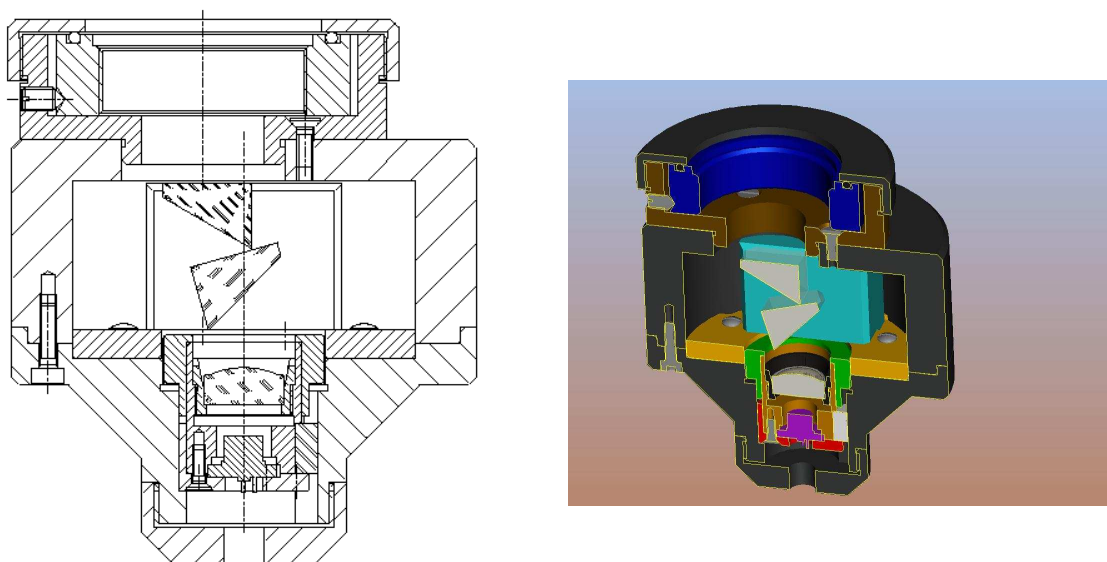
Osvětlovací systém

Osvětlovač GNS byl řešen ve dvou variantách:

- osvětlovač s laserovou diodou,
- vláknový osvětlovač.

Návrh osvětlovače s laserovou diodou byl proveden v Meoptě. Systém je složen ze zdroje elektrického napětí, který byl v rámci řešení projektu realizován v ÚPT AV ČR, laserové diody Sanyo (808 nm, 150 mW) a opticko-mechanické části pro symetrizaci svazku. Pro

symetrizaci svazku je použit systém, který je tvořen asférickou čočkou a dvojicí anamorfotických hranolů pro odstranění elipticity. Výkres sestavy a řez tělesem osvětlovače jsou v obr. 4. Systém byl navržen, optimalizován a realizován v Meoptě. Svazek, který vystupuje z osvětlovače může být rozměrově upraven pomocí laserového rozšiřovače s vhodným zvětšením. Rozměrová úprava svazku je potřebná pro optimální využití apertury optických prvků v jednotlivých nastaveních GNS. V rámci řešení projektu byla v Meoptě navržena a realizována sada rozšiřovačů pro osvětlovač GNS se zvětšením 1.4x, 1.6x, 1.8x a 2x. Snímek rozšiřovačů je v obr. 5.



Obr. 4 Výkres sestavy a řez tělesem osvětlovače pro generátor nedifrakčních svazků.



Obr. 5 Snímek sady laserových rozšiřovačů 1,4x, 1,6x, 1,8x a 2x.

Druhá varianta osvětlovače byla řešena navázáním svazku He-Ne laseru případně laseru Verdi V2 do optického vlákna (numerická apertura 0.13, módový průměr 3.3 μm). V dílně SLO UP,

byla vyrobena mechanická součást s konektorem vlákna a uložením pro kolimační čočku (ohnisková vzdálenost 25.4 mm), která se dá upevnit na těleso GNS.

Optický systém pro vytvoření nedifrakčního svazku

Základní částí GNS je optický systém, který umožňuje vytvoření P-N svazku besselovského typu a jeho následnou rozměrovou transformaci. Pro vytvoření svazku byl použit axikon s vrcholovým úhlem 178° a průměrem 25.4 mm (Eksma 130-0278). Teleskop, který vytvořený svazek transformuje je sestaven s dubletů o ohniskových vzdálenostech 35 mm a 250 mm. Z GNS v tomto případě vystupuje svazek jehož stopa má průměr jádra $400\text{ }\mu\text{m}$ a její tvar zůstává prakticky neměnný v oblasti o délce 14 m. Výměnou kolimační čočky osvětlovače je možné oblast dostupnosti svazku prodloužit na 20 m.

Diasporametr

Diasporametr je sestaven ze dvou optických klínů ve dvou variantách lámavých úhlů. V jedné mají klíny lámavý úhel 0.5° , ve druhé 1° . Diasporametr je umístěn v obrazové ohniskové rovině, kde vzniká prostorové spektrum svazku vytvořeného axikonem. Pracovní pohyby diasporametru umožňují plynulé přemístění stopy svazku v oblasti vymezené rozměry $4.5 \times 4.5\text{ mm}^2$.

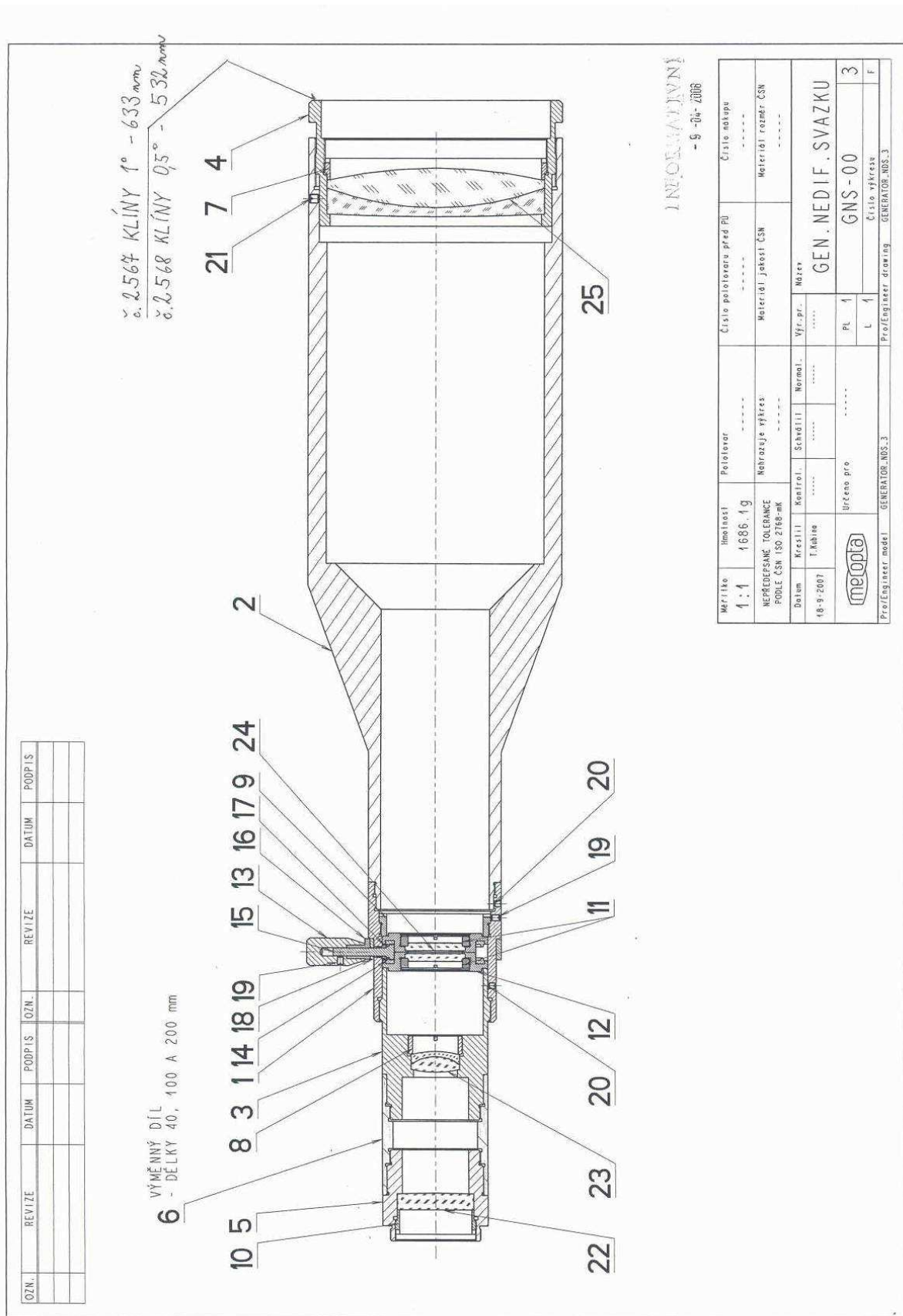
V Meoptě byly vyrobeny 3 funkční vzorky GNS, dva z nich byly předány na UP a testovány v optické laboratoři v součinnosti s He-Ne laserem (632 nm, 15 mW) a laserem Verdi V2 (532 nm, 2W). Variabilita sestavy je zvýšena možností výměny distančního tubusu, který má v obr. 7 pozici 6. Tento výměnný díl byl vyroben ve třech variantách s délkami 40, 100 a 200 mm. Výměnný díl vede k podélnému přemístění oblasti, ve které je svazek dostupný. Při použití tubusu s větší délkou se začátek oblasti dostupnosti svazku posouvá blíže ke GNS. Výkresy optické a mechanické části GNS jsou v obr. 6 a 7. Celý systém s popisem jednotlivých částí je v obr. 8, snímky systému s oběma variantami navržených osvětlovačů jsou v obr. 9.

4. Generátor nedifrakčních svazků v systému pro optické manipulace

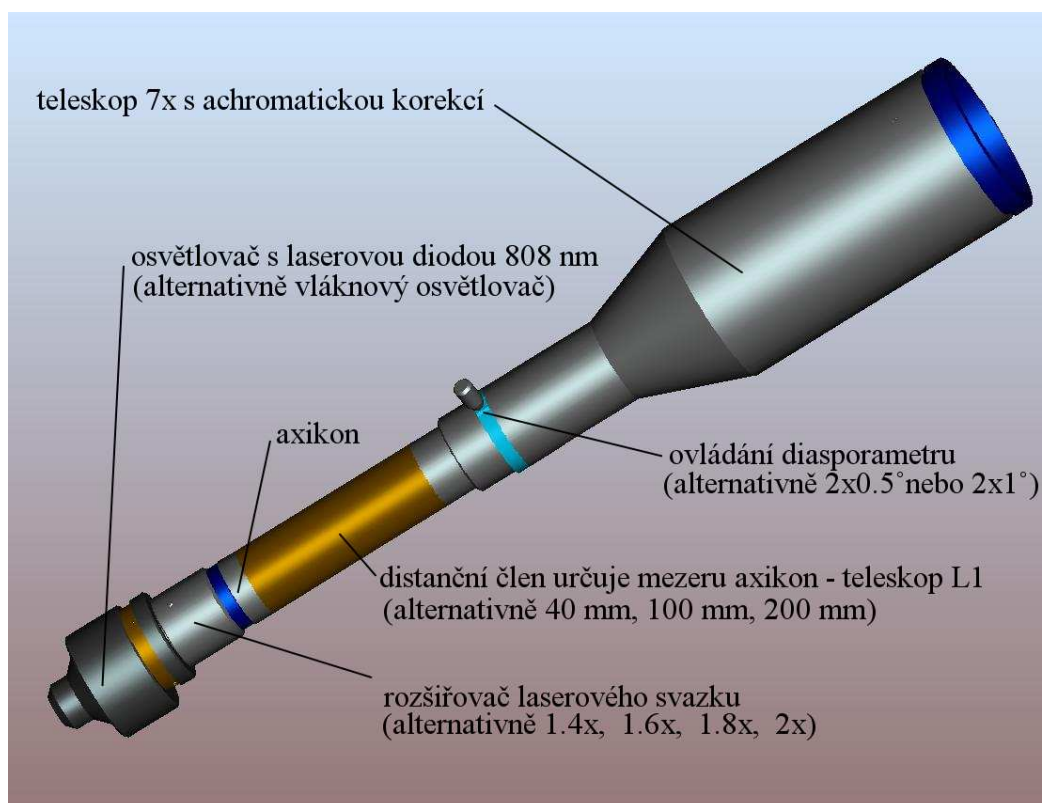
Výstupní svazek GNS je vzhledem ke svým optickým vlastnostem a možnosti plynulého nastavení stopy vhodný ke kontrolním a justážním účelům. V souvislosti s tematikou projektu byla ale hlavní pozornost zaměřena na možnost jeho využití v optických manipulacích. Při ověřovacích experimentech bylo prokázáno, že umožňuje realizaci laserové pinzety s navigací svazku. Optické schéma systému je v obr. 10. V této aplikaci je výstupní svazek GNS dále transformován teleskopem, který je sestaven z čočky o ohniskové vzdálenosti 200 mm a mikroskopového objektivu o ohniskové vzdálenosti 1.8 mm (Olympus UPLFLN 100 x O2). Tímto způsobem je vytvořen miniaturní svazek s průměrem přibližně $4\text{ }\mu\text{m}$, jehož stopu lze plynule příčně přemísťovat v oblasti $40 \times 40\text{ }\mu\text{m}^2$.

82 3 05 173
3 ks

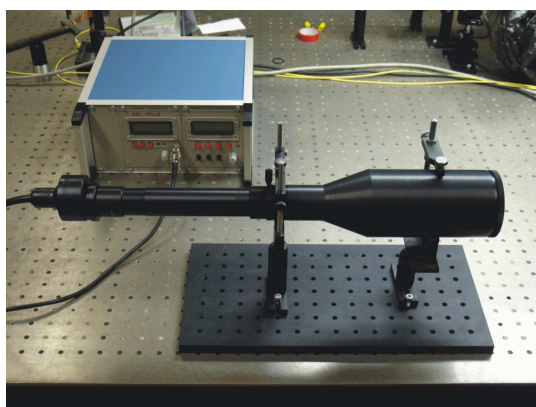
Obr. 6 Výkres optické soustavy generátoru nedifrakčních svazků.



Obr. 7 Výkres optické a mechanické sestavy generátoru nedifrakčních svazků.

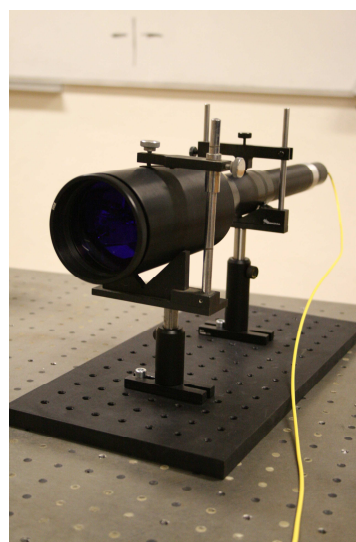


Obr. 8 Náčrtes generátoru nedifrakčních svazků s popisem jednotlivých částí.

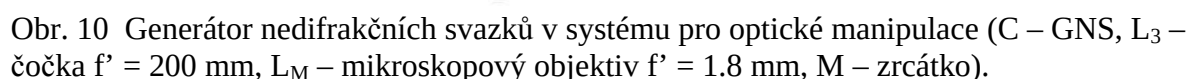


(a)

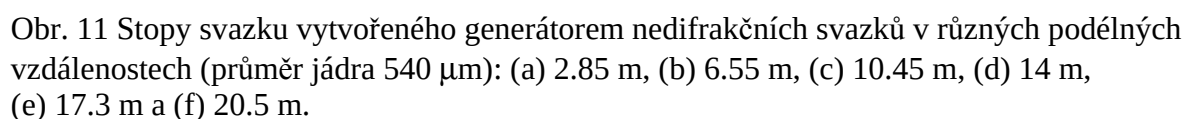
Obr. 9 Generátor nedifrakčních svazků:
(a) osvětlovač s laserovou diodou, (b) vláknový osvětlovač.

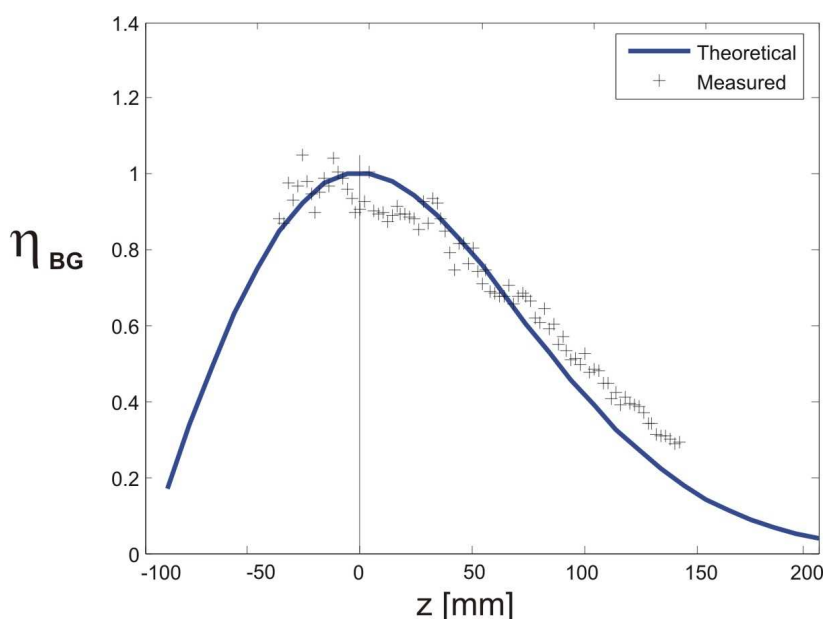


(b)



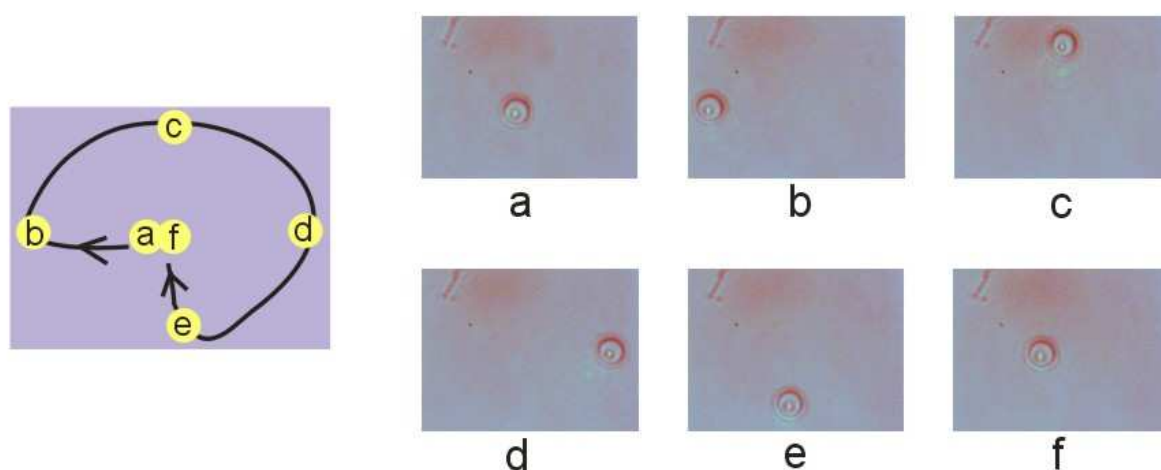
Dva funkční vzorky GNS dodané Meoptou byly testovány v laboratoři UP v Olomouci. Pozornost byla věnována ověření základních geometrických a energetických parametrů a očekávaných vlastností generovaných svazků. Stopa výstupního svazku GNS byla zachycena CCD kamerou a byly sledovány změny jejího tvaru v různých podélných vzdálenostech. Pomocí diasporometru byl rovněž ověřen rozsah krajních poloh při příčném přemístění stopy svazku. Stopy svazku zaznamenané CCD kamerou jsou v obr. 11. Při průměru svazku 540 μm se dá za dosah svazku považovat vzdálenost 20.5 m (obr. 11f). Při testování GNS byly sledovány i energetické vlastnosti svazku. Výpočetně a experimentálně byl vyhodnocován výkon v jádře svazku v různých podélných vzdálenostech. Výstupní svazek GNS byl teleskopem transformován na průměr 40 μm a zobrazen na CCD kameru. Výkon v jádře svazku byl stanoven pomocí software pro zpracování obrazové informace. Výsledky jsou znázorněny v obr. 12.





Obr. 12 Závislost normovaného výkonu přenášeného jádrem pseudo-nedifrakčního svazku v závislosti na podélné vzdálenosti.

Hlavní pozornost byla v ověřovacích experimentech zaměřena na použití GNS v systému pro optické manipulace podle obr. 10. Jako zdroj byl využíván laser Verdi V2. Svazek za mikroskopovým objektivem měl průměr stopy $4\text{ }\mu\text{m}$ a bylo ověřeno, že může při dostatečném výkonu zachytit a podélně a příčně transportovat polystyrenové kuličky (Duke Scientific) o průměru $5\text{ }\mu\text{m}$. Plynulé příčné přemístění ovládané pracovními pohyby diasporametru bylo ověřeno v oblasti $40 \times 40\text{ }\mu\text{m}^2$. Minimální výkon záření na výstupu z osvětlovače při kterém lze přemístění realizovat byl 60 mW, optimální výkon pro zabezpečení manipulací je 100 mW. V obr. 13 je znázorněno příčné přemístění kuličky podél uzavřené trajektorie. Obrázky 13a-f ukazují jednotlivé polohy částice na definované trajektorii.



Obr. 10 Příčné přemístění polystyrenové kuličky o průměru $5\text{ }\mu\text{m}$ podél uzavřené trajektorie. Pohyb je ovládán diasporametrem umístěným v generátoru nedifrakčních svazků. Schéma celého systému je v obr. 10.

Literatura

1. J. Durnin, Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory, J. Opt. Soc. Am. A 4, 651 (1987).
2. Z. Bouchal, Controlled spatial shaping of nondiffracting patterns and arrays, Opt. Lett. 27, 1 (2002).
3. Z. Bouchal, Nondiffracting optical beams: physical properties, experiments and applications, Czech J. Phys. 53, 537 (2003).
4. Z. Bouchal, Physical principle of experiments with pseudo-nondiffracting fields, Czech J. Phys. 55, 1223 (2005).