

采用超连续谱激光的双光束光纤光阱实验

胡孔云^{1,2}, 肖光宗^{1,2*}, 张莹¹, 陈鑫麟¹, 谢元平¹

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西西安 710119)

摘要:以超连续谱激光器作为捕获光源,首次提出并搭建了超连续谱双光束光纤光阱实验系统,实现了聚苯乙烯微球的捕获和操控。通过改变光纤端面间隔和调整捕获光功率的方式精确控制微球的位置,采用 CCD 图像分析方法实现了微球位置的精确测量。对微球受限布朗运动下的位置变化进行傅里叶变换,计算得到功率谱,与理论功率谱函数拟合后求出了其光阱刚度。结果表明,捕获光束的功率为 28 mW 时,光阱刚度达到 1.3×10^{-6} N/m,高于相同实验条件下单波长光纤光阱的刚度。与传统采用单色光作为捕获光源的光镊系统不同,超连续谱双光束光阱系统利用其宽谱优势,通过研究被捕获微粒的散射光谱信息可获取其尺寸、折射率等物理特征参数。

关键词:超连续谱;光纤光阱;光阱刚度;操控

中图分类号:TP394.1; TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20171003.0370

Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser

HU Kong-yun^{1,2}, XIAO Guang-zong^{1,2*}, ZHANG Ying¹, CHEN Xin-lin¹, XIE Yuan-ping¹

(1. *College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

2. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xiaoguangzong@nudt.edu.cn*

Abstract: The experimental system of dual-beam fiber optical trap is proposed and built for the first time which can realize the trapping and manipulation of polystyrene microspheres by taking the supercontinuum laser as the trapping light source. The position of the microsphere is manipulated by changing the relative position of the two optical fiber end faces and output power of the fibers. The CCD image analysis method is used to measure the position of the microsphere. The power spectrum is calculated by Fourier transform of the position variation of the confined Brown motion. After fitting the theoretical power spectrum function, the optical trap stiffness is obtained. The results show that when the power of the captured beam is 28 mW, the optical trap stiffness can reach 1.3×10^{-6} N/m, which is higher than that of the single wavelength optical trap under

收稿日期:2017-01-13;修订日期:2017-03-16

基金项目:瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLST201507)

Supported by Open Research Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics (No. SKLST201507)

the same experimental conditions. By taking advantage of the wide spectrum of the dual-beam optical trap system, the physical parameters such as the size and refractive index can be obtained by studying the scattering spectrum information of the captured particles which is different from the traditional use of monochromatic light as the captured light of the optical tweezers.

Key words: supercontinuum; fiber optical trap; stiffness of optical trap; manipulation

1 引言

光镊是根据光的力学效应设计出的一种无接触无损伤的操控微粒和活性细胞的技术,又被称为光阱。由于其具有捕获和处理非接触微观对象的独特能力,在过去的二十多年里,它在生物学、材料科学等领域的有着众多应用^[1]。

早期光镊系统采用单波长激光器作为捕获光源。单波长激光器具有良好的空间相干性和时间相干性,空间相干性保证捕获光束的能量聚焦,实现光阱大梯度力,但捕获光源类型单一。随着近几年非线性光学飞速发展,尤其是超连续谱光源的成功研制^[2],使得超连续谱激光具有高的空间相干性同时还兼有很宽的光谱范围(低时间相干性)。超连续谱激光器的产生对光镊发展有重大意义,一方面超连续谱激光良好的空间相干性可以实现光阱大梯度力用以粒子的捕获;另一方面可直接测量被捕获粒子的弹性散射光谱,结合光的力学效应与光谱学分析可以有助于实现测量微小粒子信息^[3-5]。2005年,宾夕法尼亚州立大学的 Peng Li 等人首次利用超连续谱激光搭建了单光束超连续谱光镊系统,并基于粒子在光阱中的散射谱得出粒子的折射率和尺寸信息^[6]。随后,其他研究者依据捕获粒子散射成功分析了空气中气溶胶粒子的特性^[7-9],显示超连续谱光镊对获取粒子的物理特性越来越重要。目前超连续谱光镊一般是由一个倒置的显微镜改装而成,激光束经扩束器进入倒置生物显微镜系统,被高 NA 值的显微物镜会聚后得到满足三维捕获要求的强会聚高斯光束,从而在焦点附近实现对微粒的稳定捕获。但是单光束光镊系统存在结构复杂、对被捕获粒子的微操控不够灵敏等一些问题。现有的单波长光纤光阱采用光纤代替物镜聚焦光束^[10-12],

采用光纤结构的光阱结构简单,操作灵敏。1993年, Kim 等人尝试将纤组装在一个微型芯片上,实现光阱的微型化^[13]。

本文结合单光束超连续谱光镊和光纤光镊各自的优势将光纤结构应用于超连续谱光阱中,以超连续谱激光器作为捕获光源,提出并搭建了超连续谱双光束光纤光阱新结构实验系统。既可以利用捕获光的宽光谱优势对粒子特征进行分析实现粒子的物理属性的测量;也有利于粒子的精确微操控;光纤系统结构简单、操作灵活,符合宽谱光阱的小型化与集成化发展趋势。

2 实验系统结构

搭建超连续谱双光束光纤光阱系统结构如

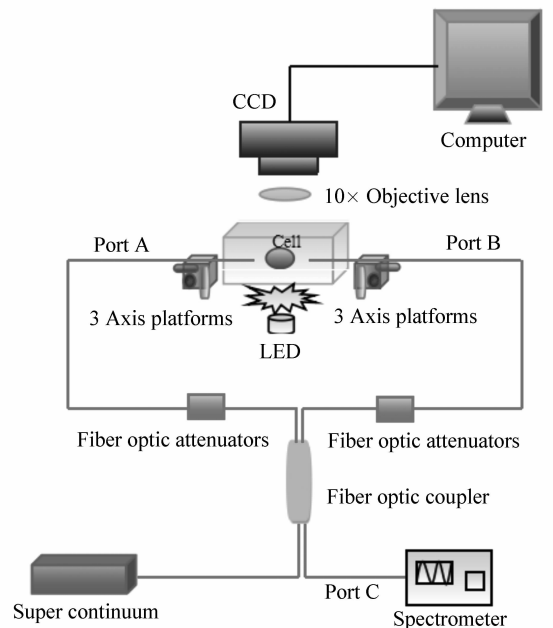


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

图 1 所示。整个系统分为捕获和成像两个部分,捕获部分由超连续谱激光器、50/50 耦合器、光纤衰减器、位移台、等构成,捕获室装有聚丙烯球的溶液。激光器发出激光通过光纤进入 50/50 耦合器分成所需的两束捕获光束,捕获光束分别经过一个衰减器到达捕获室,传输光纤分别固定在三维位移台上。衰减器控制捕获光束的功率,微球在捕获室内被捕获。成像部分由 LED、物镜、CCD 和计算机组成,LED 发出均匀的光照在捕获室内部,通过 10 倍物镜将捕获室内的光阱中心成像在与计算机连接的 CCD 上。50/50 耦合器的另一输入端的端口 C 可以接入功率计或者光谱仪来测量捕获微球时反射光功率和反射光谱。

图 2 是捕获光束光功率为 28 mW 时两束捕获光束的功率谱。如图所示,捕获光束的波长从 700 nm 到 1 400 nm,且在带宽范围内光功率谱比

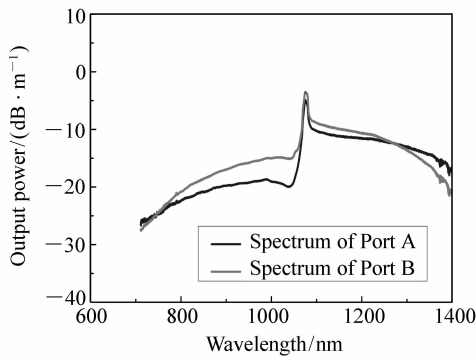


图 2 光纤输出端捕获光束光谱图

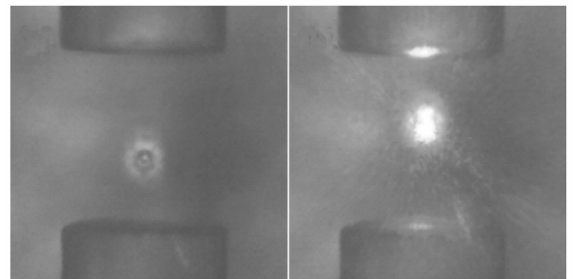
Fig. 2 Spectrogram of the captured beam from the output end of the optical fiber

较平稳,有利于探究影响被捕获粒子散射特性的因子。

3 超连续谱双光束光纤光阱捕获实验

3.1 微球的捕获与操纵

超连续谱双光束光纤光阱系统成功实现了微米级粒子的捕获。图 3 所示是光阱系统捕获直径为 10 μm 的微球。从图中可以发现,捕获室内被捕获微球的散射现象很明显,当捕获光束功率为 9 mW 时,视野中清晰呈现粒子的大小,随着捕获光束功率越大,散射越强烈。



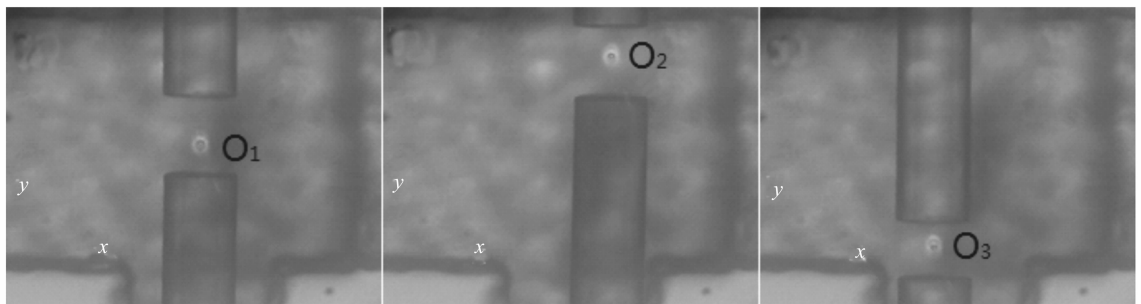
(a) 捕获光束光功率为 9 mW (b) 捕获光束光功率为 28 mW
(a) Captured power of light is 9 mW (b) Captured power of light is 28 mW

图 3 直径为 10 μm 小球被光阱捕获

Fig. 3 A 10- μm polymer microsphere is trapped by the optical tweezer

微球在捕获室内被光阱稳定捕获时,图 1 中的光阱系统可以通过两种方式对微球的位置进行微操控。

第一种方式是调节位于捕获室两端的三维位



(a) 图中微球被捕获在 O_1 点 (b) 微球被移动到 O_2 点 (c) 微球被移动到 O_3 点
(a) Microspheres are trapped at the point O_1 (b) Microspheres are moved to the point O_2 (c) Microspheres are moved to the point O_3

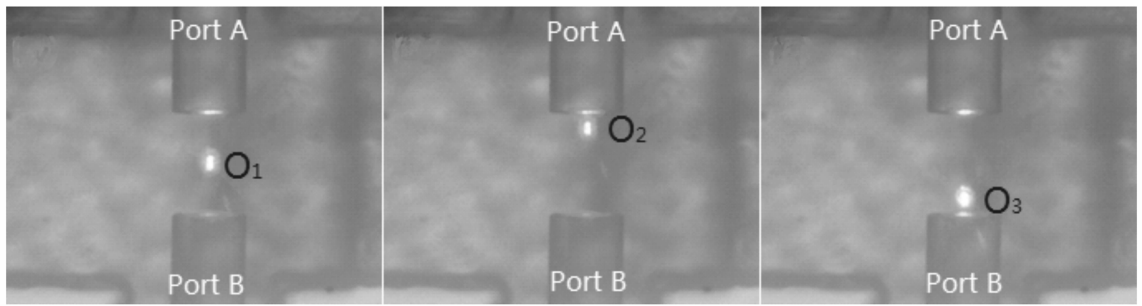
图 4 移动光纤改变光阱中心微球所处位置

Fig. 4 A position change of microspheres in the optical trap center by moving optical fiber

移台改变传输光纤的相对位置,实现对微球的微操控。实验结果表明,同时移动捕获室两端的捕获光束,改变光阱中心位置,光阱中心的微球也随着移动。如图4所示,图4(a)中微球在 O_1 点被捕获。图4(b)是沿 XY 正方向移动光纤,微球移动到 O_2 点,并且相对光纤位置保持不变;图4(c)沿 XY 负方向移动光纤,微球随光纤移动到 O_3 点。光阱中捕获的粒子位置通过光纤可以实现简单、精确操控。

第二种方式是利用光阱系统中光纤衰减器控制捕获光束的光功率来实现微球位置移动。当其

中一束捕获光束光功率改变时,光阱中心则偏向功率弱的捕获光束一端。如图5(a)所示,当捕获光束功率相等时,微球被稳定地捕获在两根光纤中间 O_1 点位置。图5(b)中,减小A输入端捕获光束功率,则微球沿光纤轴线方向移动,功率停止减弱,则小球静止在 O_2 点。到达M点后,慢慢增大A端捕获光束功率,则小球沿轴线方向往B端移动,图5(c)是停止增大A段功率则小球停在 O_3 点。实际应用中,若捕获室两端的光纤被固定,则可通过调节捕获光束功率差实现微球位置的微操纵。



(a) 图中微球被捕获在 O_1 点 (b) 微球被移动到 O_2 点 (c) 微球被移动到 O_3 点
(a) Microspheres are trapped at the point O_1 (b) Microspheres are moved to the point O_2 (c) Microspheres are moved to the point O_3

图5 调整光束光功率改变光阱中心微球位置

Fig. 5 A position change of microspheres in the optical trap center by adjusting the power of the light beam

3.2 光阱刚度标定

光镊系统不仅是操纵微粒定位的工具,其另一个重要功能是进行微小力测量。理论和实验表明光阱可以近似看成简谐势阱,粒子在光阱内偏移阱中心的位移 x 与粒子受到的光阱力成正比。即:

$$\vec{F}_{\text{Trapping}} = -k_x \cdot \vec{x}, \quad (1)$$

比例系数 k_x 为光阱刚度。因此光阱刚度的标定是衡量光阱性能的重要指标。光阱刚度的标定方法很多种,文章中用功率谱法进行超连续谱双光束光纤光镊系统的光阱刚度标定^[14-15]。

功率谱法是基于粒子的热运动分析。被光阱捕获粒子作受到简谐势场限制的热运动,粒子的热运动方程为:

$$m \ddot{x} + \gamma \dot{x} + k_x x - F_{\text{rand}}(t) = 0, \quad (2)$$

式中, $\gamma = 6\pi\eta a$,在低 Reynolds 数下,微米级大小粒子类似于过阻尼振子^[16],惯性力相对于粘滞阻力可以忽略不计。对式(2)做傅里叶变换得到:

$$(k_x - i2\pi f\gamma)G(f) = F_{\text{rand}}(f). \quad (3)$$

则双向功率谱为:

$$|G(f)|^2 = \frac{|F_{\text{rand}}(f)|^2}{4\pi^2\gamma^2(f_c^2 + f^2)}, \quad (4)$$

式中, $f_c = k_x/2\pi\gamma$,且 $\langle F_{\text{rand}(t)}x \rangle = 0$ 。 $F_{\text{rand}}(t)$ 自相关函数为:

$$H(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(\tau)F(\tau+t) d\tau. \quad (5)$$

因为随机力对微米小球的作用是瞬时和完全独立。功率谱函数可以简化为:

$$|G(f)|^2 = \frac{A}{f_c^2 + f^2}. \quad (6)$$

因此实验测量时,利用 CCD 对捕获粒子的图像进行采集,CCD 图像采集速率为 15 frame/s。利用灰度特性对被光阱捕获的微粒的位置进行大量的测量^[17],得到微粒位置随时间变化的关系,并对结果进行傅里叶变换计算功率谱,然后与理论的功率谱函数进行拟合,就可以得到 f_c ,并进而

得到光阱刚度 k_x 。在一定范围内,光阱刚度值随着功率成线性关系。实验结果表明,捕获光束的光功率为 28 mW 时,利用 MATLAB 软件处理数据得出功率谱如图 6 所示。测得此时的光阱刚度为 1.3×10^{-6} N/m,误差在 $\pm 0.15 \times 10^{-6}$ N/m 以内。文献[17-19]中提到的单波长光纤光阱刚度只达到 10^{-7} N/m 量级,而超连续双光束光纤光阱的刚度高于相同实验条件下单波长光纤光阱的

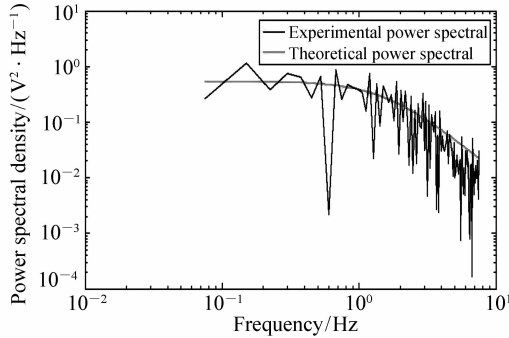


图 6 功率谱及其拟合曲线

Fig. 6 Theoretical power spectrum and fitting curve of experimental power spectrum

刚度^[18-20]。

4 结 论

搭建了基于超连续谱光源的双光束光纤光阱系统,实现了宽光谱光源对于微米级粒子的捕获,通过利用三维位移台移动光纤和改变捕获光束的光功率两种方式对被捕获粒子进行了精确操控。根据微球在布朗运动下的位置变化进行傅里叶变换得到功率谱,对功率谱进行拟合后求出了其光阱刚度,达到 10^{-6} N/m 量级,高于同实验条件下单波长光纤光阱的光阱刚度。

与传统的超连续谱光镊相比,双光束光纤结构的超连续谱光阱采用光纤结构,不再需要高倍物镜进行光场聚焦来产生捕获粒子所需的梯度力,可以使得整个系统简单化,小型化。超连续谱光源具有独特的谱宽优势,利用小球在光阱中散射谱,我们可以探究微球的本身的粒子信息。超连续谱光阱系统在生物学和分散体系等领域的研究中将会发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] KEIR C N, BLOCK S M. Optical trapping[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(9): 2787-2809.
- [2] ALFANO R. The supercontinuum laser source[D]. New York: Sec. Edition, Springer, 2006.
- [3] GUILLON M. Field enhancement in a chain of optically bound dipoles[J]. *Opt. Express*, 2006, 14: 3045-3055.
- [4] FISCHER P, CARRUTHERS A E, WREGHT E M, *et al.*. Enhanced optical guiding of colloidal particles using a supercontinuum light source[J]. *Opt. Express*, 2006: 145792-5802.
- [5] 方晖, 杨爱萍. 用于微米球形颗粒超分辨尺度测量的背向弹性散射光谱的获取[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 547-554.
FANG H, YANG A P. Acquisition of elastic backscattering spectra for microsphere sizing beyond diffraction limit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 547-554. (in Chinese)
- [6] LI P, SHI K, LIU Z. Manipulation and spectroscopy of a single particle by use of white-light optical tweezers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(2): 156-158.
- [7] NITKOWSKI A G, MICHAL L. On-chip supercontinuum optical trapping and resonance excitation of microspheres[J]. *Optics Letters*, 2010, 35: 1626-1628.
- [8] JONES S H, KING M D, WARD A D. Determining the unique refractive index properties of solid polystyrene aerosol using broadband Mie scattering from optically trapped beads[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics Pccp*, 2013, 15(47): 20735-20741.
- [9] GUILLON M, DHOLAKIA K, MCGLOIN D. Optical trapping and spectral analysis of aerosols with a supercontinuum laser source[J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7655-64.
- [10] XIAO G, YANG K, LUO H, *et al.*. Orbital rotation of trapped particle in a transversely misaligned dual-fiber optical trap[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-1.
- [11] CHEN X L, XIAO G Z, LUO H, *et al.*. Dynamics analysis of microsphere in a dualbeam fiber-optic trap with transverse

- offset[J]. *Optics Express*,2016,24(7).
- [12] PINON T M. Fiber-based dual-beam optical trapping platform for stretching lipid vesicles[J]. *Pro Quest Dissertations & Theses Global*,2013.
- [13] CONSTABLE A, KIM J, MERVIS J, *et al.*. Demonstration of a fiber-optical light-force trap[J]. *Opt. Lett.*,1993,18(21):1867-1869.
- [14] 龚鑫. 纳米光镊系统的研制及微小力学量的测量[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
GONG Z. Development of nano optical Tweezers system and measurement of small mechanical quantities[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2005. (in Chinese)
- [15] 周金华. 光镊的理论模型及纳米颗粒的操纵[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
ZHOU J H. Theoretical model of optical tweezers and manipulation of nanoparticles[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2010. (in Chinese)
- [16] BECHHOEFER J, WILSON S. Faster, cheaper, safer optical tweezers for the undergraduate laboratory[J]. *American J. Physics*,2002,70(4):393-400.
- [17] 董宇星,刘伟宁. 基于灰度特性的海天背景小目标检测[J]. 中国光学,2010,3(3):252-256.
DONG Y X, LIU W N. Detection of sea-sky line in complicated background based on grey characteristics[J]. *Chinese Optics*,2010,3(3):252-256. (in Chinese)
- [18] PINON T M. Fiber-based dual-beam optical trapping platform for stretching lipid vesicles[D]. California:University of California, Merced,2013.
- [19] LI Z G, S Y, H H Z, *et al.*. Simulation and measurement of stiffness for dual beam laser trap using residual gravity method[J]. *International J. Nanotechnology*,2015,12:849-859.
- [20] DECOMBE J B, HUANT S, FICK J. Single and dual fiber nano-tip optical tweezers;trapping and analysis[J]. *Optics Express*,2013,21(25):30521-30531.

作者简介:



胡孔云(1991—),男,安徽池州人,硕士研究生,2014年于安徽工业大学获得学士学位,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail:hukongyun1@sina.com



肖光宗(1983—),男,湖北襄阳人,博士,讲师,2005年于武汉大学获得学士学位,2007年、2011年于国防科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电惯性技术方面的研究。E-mail:xiaoguangzong@nudt.edu.cn