

# 基于斐波那契波带片的三维光镊

张心宇<sup>1</sup>, 程书博<sup>2</sup>, 陶少华<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083;

<sup>2</sup>长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023;

<sup>3</sup>中南大学超微结构与超快过程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083

**摘要** 斐波那契波带片(FiZP)在焦平面上有两个不同的主焦点且具有独特的自恢复特性,因此 FiZP 光束能够在不同平面同时捕获微粒,同时对微粒实现焦平面上的自由移动。仿真分析了 FiZP 的构成与轴向强度,利用液晶空间光调制器、倒置光学显微镜以及光学元件组合搭建实验平台,对微粒进行三维捕获。实验验证了 FiZP 光束具有三维光学捕获特性,并可用于构建三维光镊,实现复杂的捕获功能。

**关键词** 光电子学; 三维光镊; 斐波那契波带片(FiZP); 自恢复特性; 双焦点

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1035001

## Three-Dimensional Optical Tweezers Based on Fibonacci Zone Plate

Zhang Xinyu<sup>1</sup>, Cheng Shubo<sup>2</sup>, Tao Shaohua<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

<sup>2</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

<sup>3</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of Super Microstructure and Ultrafast Process, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

**Abstract** Fibonacci zone plate (FiZP), with properties of bi-foci in focal plane and self-reconstruction, can simultaneously trap particles positioned in two different planes and move particles freely in the focal plane. The structure and axial strength of FiZP are analyzed. The experimental platform is established by combination of liquid crystal spatial light modulator, inverted optical microscope and optical elements, and used to capture particles in three dimensions. Experiments show that the FiZP beam has three-dimensional optical acquisition characteristics, and can be used to build three-dimensional optical tweezers and achieve complex capture function.

**Key words** optoelectronics; three-dimensional optical tweezers; Fibonacci zone plate (FiZP); self-reconstruction property; bi-foci

**OCIS codes** 350.4855; 350.3950

## 1 引 言

激光聚焦形成势阱,势阱可用于光学捕获,即光镊。自光镊诞生以来<sup>[1]</sup>,激光在捕获操纵粒子时具有非接触性、无机械损伤、精确定位等特点,被广泛应用。各种不同的新型光束也被相继提出,用于进行光镊操作,三维光学捕获成为研究热点。Melville 等<sup>[2]</sup>通过分时与全息图的方式演示了三维捕获;Hwang 等<sup>[3]</sup>实现了三维扫描光镊;Jones 等<sup>[4]</sup>利用电光偏转器的环形扫描光镊功能成功地在电子电路上完成了对纳米线的控制性组装;彭飞<sup>[5]</sup>使用扫描振镜产生了  $3 \times 3$  的光点阵列,并实现了对 9 个酵母菌细胞的同时捕获;Liu 等<sup>[6]</sup>利用倾斜的双光纤光镊系统实现了对二氧化硅微粒的三维光学微操作,并测量了微粒的移动距离;Benito 等<sup>[7]</sup>利用全息光镊技术构造了三维晶体模板;Zhong 等<sup>[8-9]</sup>利用三维光镊技术成功地捕获动物活体内

收稿日期: 2017-03-24; 收到修改稿日期: 2017-05-19

作者简介: 张心宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事光镊方面的研究。E-mail: zhangxinyu11014@163.com

导师简介: 陶少华(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光镊与光信息方面的研究。

E-mail: eshtao@csu.edu.com(通信联系人)

的细胞,并介绍了光镊技术的现状。

分形波带片(FZP)光束具有多个焦点,并且可以在传播过程中绕过障碍物实现光场分布的重建。基于此,FZP 光束在实现三维微操作时,不会因样品或者其他杂质的遮挡影响光束的传播,并且其多焦点的特性能够使其很方便地实现三维捕获,即在传播方向上同时操控不同位置的微粒。但是其主焦点与次焦点的强度相差比较大,用于光镊时容易造成捕获不均衡。从 2003 年,Saavedra 等<sup>[10]</sup>首次提出 FZP 以来,FZP 以其独特的分形结构得到了广泛的研究。2006 年,Tao 等<sup>[11]</sup>提出用 FZP 的涡旋相位形成一系列涡旋光阱。2008 年,Mendoza-Yero 等<sup>[12]</sup>提出了广义的 FZP,并研究了其轴向聚焦特性,发现其具有与普通的 FZP 相似的性质。2013 年,Tao 等<sup>[13]</sup>提出了一种可自定义三维焦距的波带片,并提出 FZP 具有自恢复特性,指出 FZP 光束可用于构建三维光镊。2016 年,Cheng 等<sup>[14-15]</sup>通过 FZP 的自恢复特性实现了 FZP 光束的三维捕获;同年,分束型 FZP 也实现了三维光镊,且三维光镊的焦点位置可精确调制。斐波那契(Fibonacci)数列又称为黄金分割数列,通过该数列可以产生斐波那契波带片(Fibonacci Zone Plate, FiZP)。FiZP 是由斐波那契数列衍化形成的一种 FZP,它具有与一般的 FZP 不同的轴向特性,并可与 FZP 一样适用于三维光镊。2016 年,Dai 等<sup>[16]</sup>对 FiZP 的聚焦特性进行了研究,从文中可以明确得出 FiZP 是一种具有双焦点的 FZP。迄今为止,未见这种具有双焦点和分形结构的波带片用于光镊研究的报道。

不同于普通的 FZP,FiZP 不仅具有多焦点及自恢复特性,而且具有两个焦距相差不远且强度相当的焦点。具有双焦点特性的 FiZP 比普通 FZP 在三维光镊同时捕获多粒子时,具有更高的可靠性,且由于 FiZP 双焦点的强度大小相当,两个焦点捕获样品时也会具有相当的捕获效果。例如,当使用光镊对活体细胞进行捕获时,强度过大容易造成细胞失活,强度过小又不易进行捕获。若用主次焦点强度相差较大的 FZP 进行三维捕获,很难控制其强度的分布,而 FiZP 强度相当的双焦点就可以很好地解决这个问题。本文将对 FiZP 的构成与轴向强度进行分析,并基于全息光镊<sup>[17]</sup>技术,利用液晶空间光调制器(SLM)、倒置光学显微镜以及光学元件组合搭建实验平台<sup>[18]</sup>,实现 FiZP 光束对微粒的三维捕获。

## 2 理论模型与仿真结果

FZP 由具有不同分形结构的孔径组成,孔径由透明与不透明的相间结构的圆环组成,分别将透光与不透光的像素设置为 1 与 0。斐波那契的一维基本结构如图 1 所示<sup>[19]</sup>,它的递推关系为  $F_{A,B}(S) = F_{A,B}(S-1) + F_{A,B}(S-2)$ ,其中  $S \geq 2$ , $S$  表示数列的阶数,A、B 分别表示透光和不透光部分。设定  $F(0)$  为 A, $F(1)$  为 B,当阶数趋向无穷大时,透光与不透光的宽度比约为  $(\sqrt{5}+1)/2$ 。为了构造一个轴对称的二维结构,将图 1(a)的一维结构以一个半径轴旋转一圈,由此得到了如图 1(b)所示的波带片,此波带片由斐波那契一维数学模型生成,其中  $S=9$ 。

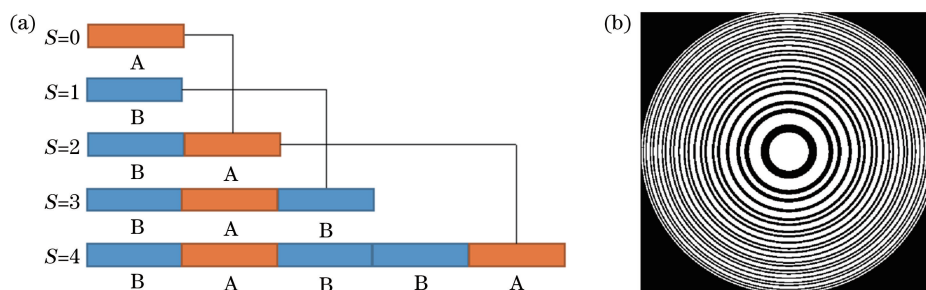


图 1 (a)斐波那契分形的一维数学模型;(b)  $S=9$  时从斐波那契一维数学模型生成的 FiZP 结构

Fig. 1 (a) One-dimensional mathematical model of Fibonacci fractal; (b) FiZP structure generated from the one-dimensional mathematical model of Fibonacci fractal when  $S=9$

波带片的制作方法主要有微制作法、液晶显示等。由于 FiZP 的参数不同,其结构也不同,利用液晶显示器可做灵活的动态调整,故文中利用 SLM 来产生波带片。实验中所用到的 SLM 的像素个数为  $512 \times 512$ ,每个像素边长为  $15 \mu\text{m}$ ,所能显示的波带片直径为  $7.68 \text{ mm}$ 。波带片的波带数量与阶数有关,当阶数越大时波带数量越多,而波带数量越多则波带片的焦点的成像效果越好。实验中光波的波长为  $532 \text{ nm}$ ,若波

带片阶数过大,最外环波带片因太细而难以显示。通过 Matlab 的仿真分析,发现  $S=9$  的情况下 FiZP 有较好的成像效果,此时两个焦点的位置可近似表示为<sup>[20]</sup>

$$f_1 = a^2 / (2\lambda F_{S-1}), f_2 = a^2 / (2\lambda F_S), \quad (1)$$

式中  $a$  为波带片半径,  $\lambda$  为入射光的波长,  $N$  为分形结构的段数,  $S$  为对应 FZP 的阶数。FiZP 的第二焦点的位置与 FZP 的第一个次焦点位置相同。

基于菲涅耳近似,可以得到光瞳平面  $z$  处的光强大小,即

$$I(z) = \left( \frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_0^a p(r_0) \exp\left(-i \frac{\pi}{\lambda z} r_0^2\right) r_0 dr_0 \right|^2. \quad (2)$$

由于实验中样品的直径为  $3 \mu\text{m}$ , 激光波长为  $532 \text{ nm}$ , 光束捕获力的计算采取几何光学模型(RO 模型)。单光束梯度阱几何光学模型由 Ashkin 建立<sup>[18]</sup>, 作用力的表达式为

$$F = Qn_1P/c, \quad (3)$$

式中  $n_1$  为周围介质的折射率,  $c$  为真空中的光速,  $Q$  为效率因子,  $P$  为光的功率。由(2)式和(3)式,可以计算出焦点处光镊作用力的分布和大小。

以平面角谱理论对 FiZP 的轴向强度分布做 Matlab 仿真,如图 2、3 所示。图 2 为 FiZP 光束沿  $z$  轴方向的强度分布图,从图中可以看出,FiZP 在轴向传播时的主次焦点强度大小相当,都可用于光学捕获。图 3 为 FiZP 在  $x-z$  平面的强度分布示意图,两个焦点的强度以颜色的亮度进行表示。由于纯相位型衍射光学元件比振幅型衍射光学元件的衍射效率更高,将每个像素透过率的值 0、1 分别换成相位值  $0$ 、 $\pi$ 。模拟中所用的激光波长为  $532 \text{ nm}$ , FiZP 光束的主焦点距离光源  $659 \text{ mm}$ , 次焦点距离光源  $409 \text{ mm}$ , 主次焦点之间的距离为  $250 \text{ mm}$ 。实验中,仅使用两个主焦点进行光镊实验。此外,由于 FiZP 光束具有自恢复效应,当 FiZP 光束对粒子进行捕获时,已捕获的粒子不会影响光束的后续传播。

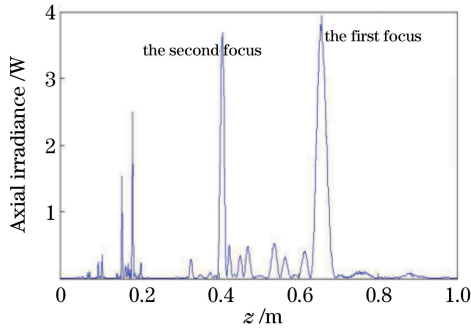


图 2 FiZP 的轴向强度分布图

Fig. 2 Axial intensity distribution of FiZP

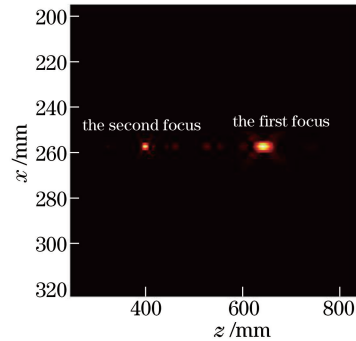


图 3 FiZP 在  $x-z$  平面的模拟强度分布示意图

Fig. 3 Calculated intensity distribution of FiZP in the  $x-z$  plane

### 3 实验及结果

图 4 为实验光路示意图,实验采用倒置的油滴显微镜,且光束从下往上倾斜入射到物镜和 CCD。如图 4 所示,盖玻片与载玻片之间放置适宜浓度的聚苯乙烯小球,光束沿着与竖直方向约  $36^\circ$  的夹角倾斜入射到溶液池中。可以从 CCD 中观察到两个主焦点之间的位置与光轴也会成  $36^\circ$ , 此倾斜入射的方法有利于实验中确定主焦点的具体位置。

为了实现上述的 FiZP 的光场分布及其对粒子的捕获,搭建了相应的实验平台系统,系统的光路图如图 5 所示,该实验系统由光源(激光器)、扩束系统、SLM、望远系统、光镊操控平台、光束延迟系统及 CCD 组成。激光器(Genesis MX532-1000 STM, Coherent 公司)最大输出功率为  $1000 \text{ mW}$ , 且功率连续可调,波长为  $532 \text{ nm}$ 。在实验中将功率调至  $800 \text{ mW}$ 。SLM(XY phase series, BNS 公司)为纯相位空间光调制器,分辨率为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ , 且每个像素为边长  $15 \mu\text{m}$  的正方形。照明光源为白光,显微镜(Olympus 公司)包含油浸显微镜物镜(数值孔径  $NA$  为  $1.3$ ), 放大倍数为  $100$  倍。激光器发出的光,经透镜 L1、L2 组成的系

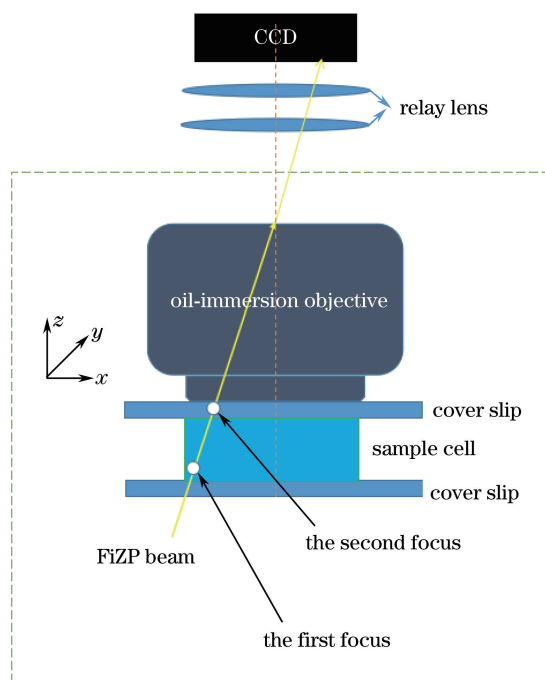


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the experimental setup

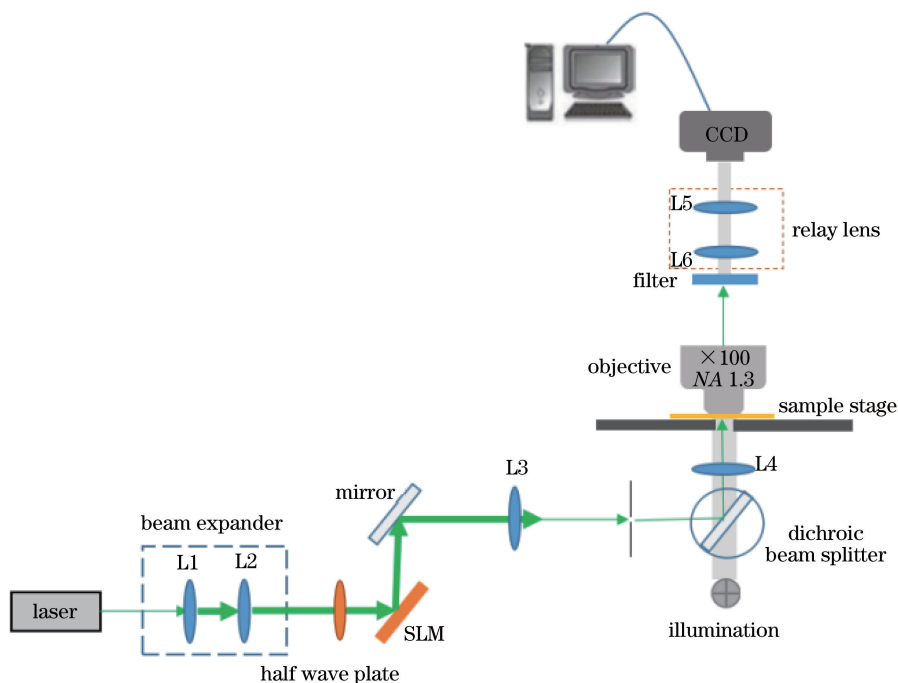


图 5 实验系统光路图

Fig. 5 Optical path schematic of experiment system

统扩束后,入射到 SLM 上,将图 6(a)所示的相位全息图导入并显示至 SLM 的液晶屏上,使激光光束被液晶屏上加载的 FiZP 调制。光束被 L3 凸透镜聚焦后通过光阑,再由 L4 凸透镜再次聚焦后通过显微镜物镜。L3 焦距为 750 mm,L4 焦距为 30 mm,故光束两个主焦点之间的间距通过 L3、L4 组成的倒置望远系统缩小为原来的 1/25。滤波器可过滤 532 nm 波长的激光,只让照明光源所发的白光通过样品进入最后的 CCD 中。通过计算机屏幕观察样品台上进行的实验。L5、L6 分别为焦距 100 mm、40 mm 的凸透镜,它们组成了一个光束延迟系统,使透过显微镜物镜的光束进入 CCD 中。

样品池中的样品为直径  $3\ \mu\text{m}$  的聚苯乙烯小球。由于原装聚苯乙烯小球溶液非常浓稠,使用时必须将其稀释。用胶头滴管吸取少量聚苯乙烯小球溶液置于培养池中,再用去离子水稀释后待用。微粒在稀释后的溶液中不易聚集成团且布朗运动明显。用中间带圆孔的贴纸粘在  $0.5\ \text{mm}$  厚的载玻片表面,粘贴纸的厚度约  $100\ \mu\text{m}$ 。将样品溶液滴入圆孔区域里面,待其均匀铺开后再盖上盖玻片。

通过 Matlab 产生了如图 6(a)所示 FiZP 的相位全息图,该图由  $512 \times 512$  个像素组成,所有像素相位值都为  $0$  或  $\pi$ 。图中束状线为叠加的衍射光栅,光栅常数为  $0.25\ \text{mm}$ 。图 6(b)、(c)为 CCD 拍摄到的 FiZP 的两个主焦点,其中倾斜虚线箭头表示焦点在轴向与横向移动的方向,水平虚线表示水平线。由于光束倾斜入射到 CCD,所以在视觉位置上有一个偏角,约为  $36^\circ$ 。

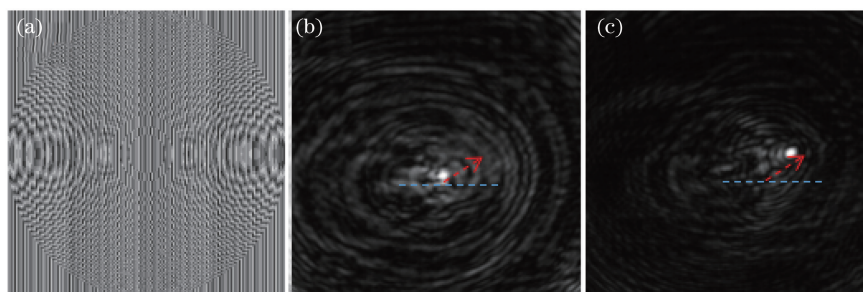


图 6 (a)叠加了光栅相位的 FiZP 全息图;(b) CCD 拍摄的第一个主焦点;(c) CCD 拍摄的第二个主焦点  
Fig. 6 (a) Hologram of FiZP with optical grating phase; (b) the first prime focus captured by CCD;  
(c) the second prime focus captured by CCD

图 7(a)~(d)显示了第一个主焦点的纵向捕获微粒的过程,图中的圆圈表示主焦点的位置,倾斜虚线箭头表示焦点的移动方向。图 7(a)~(d)呈现了小球从其他平面往焦平面移动且最后稳定于焦平面上的过程,全过程所用的时间约为  $1\ \text{min}$ 。从图片的圆圈中可以看出微粒从模糊状态(未处于物镜的焦平面)至清晰状态(正好处于物镜的焦平面)的改变,实现了 FiZP 光束第一个主焦点的纵向捕获。

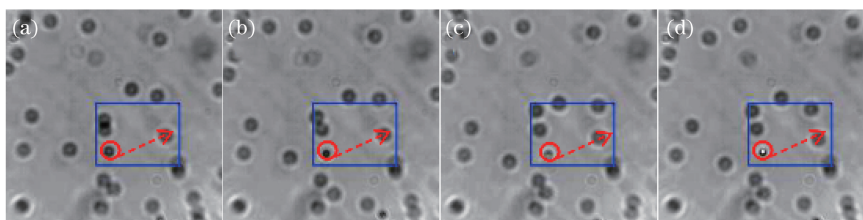


图 7 FiZP 光束第一个主焦点纵向捕获微粒

Fig. 7 Longitudinal capture of particle by the first prime focus of FiZP beam

将样品池与物镜同时向上移动  $100\ \mu\text{m}$ (至第二个主焦点到达显微镜物镜的焦平面上),此时圆圈代表第二个主焦点的位置,倾斜虚线箭头表示焦点的移动方向。可以看到,在该主焦点的位置处有粒子被纵向捕获,图 8(a)~(d)显示了光束第二个主焦点对粒子的捕获过程。由于溶液池的池深为  $100\ \mu\text{m}$ ,故第一个主焦点所捕获的粒子此时脱离了捕获而第二个主焦点稳定地捕获了微粒。

图 9(a)~(d)显示了捕获粒子在焦平面上的任意移动,图中虚线方框为静止的参考微粒,水平虚线箭头

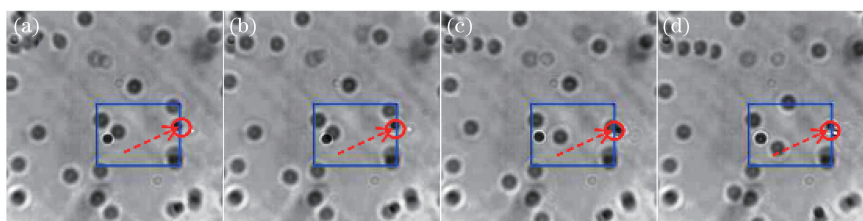


图 8 FiZP 光束第二个主焦点纵向捕获微粒

Fig. 8 Longitudinal capture of particle by the second prime focus of FiZP beam

表示微粒移动方向,倾斜虚线箭头表示焦点的移动方向。可以计算得出,在 FiZP 主焦点向左移动约  $20\ \mu\text{m}$  的过程中,微粒被焦点稳定地捕获且随着焦点的移动而移动。

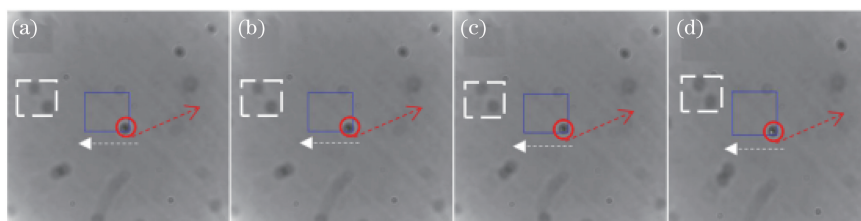


图 9 微粒在水平面的捕获与移动

Fig. 9 Capture and move of particle in horizontal plane

## 4 结 论

实验验证了基于斐波那契波带片(FiZP)的双焦点光学捕获微粒。结果显示,光束的两个主焦点可以在两个不同的平面同时捕获微粒,且由于该光束具有自恢复特性,不会由于光在前一个平面捕获微粒而影响到后一个平面的捕获效果。实验结果也证明了 FiZP 光束能够用于构建三维光镊并实现复杂的捕获功能,如在两个不同的平面精确捕获不同微粒并实现操控。该实验研究在生物学方面具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, *et al.* Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(5): 288-290.
- [2] Melville H, Milne G F, Spalding G C, *et al.* Optical trapping of three-dimensional structures using dynamic holograms [J]. *Opt Express*, 2003, 11(26): 3562-3567.
- [3] Hwang S, Park I, Song J, *et al.* Three-dimensional scanning optical tweezers[C]. *SPIE*, 2005, 6048: 604803.
- [4] Jones P H, Stride E, Saffari N. Trapping and manipulation of microscopic bubbles with a scanning optical tweezers[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(8): 081113.
- [5] Peng Fei. Theoretical study on optical trapping and application of optical tweezers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.  
彭飞, 光学捕获理论及光镊的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- [6] Liu Z, Guo C, Yang J, *et al.* Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: Fabrication and application[J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12510-12516.
- [7] Benito D C, Carberry D M, Simpson S H, *et al.* Constructing 3D crystal templates for photonic band gap materials using holographic optical tweezers[J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13005-13015.
- [8] Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, *et al.* Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers[J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 1768.
- [9] Li Yinmei, Gong Lei, Li Di, *et al.* Progress in optical tweezers technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0101001.  
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现况[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0101001.
- [10] Saavedra G, Furlan W D, Monsoriu J A. Fractal zone plates[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(12): 971-973.
- [11] Tao S H, Yuan X C, Lin J, *et al.* Influence of geometric shape of optically trapped particles on the optical rotation induced by vortex beams[J]. *J Appl Phys*, 2006, 100(4): 043105.
- [12] Mendoza-Yero O, Fernández-Alonso M, Mínguez-Vega G, *et al.* Fractal generalized zone plates[J]. *J Opt Soc Am A*, 2009, 26(5): 1161-1166.
- [13] Tao S H, Yang B C, Xia H, *et al.* Tailorable three-dimensional distribution of laser foci based on customized fractal zone plates[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(3): 035003.
- [14] Cheng S B, Zhang X Y, Ma W Z, *et al.* Fractal zone plate beam based optical tweezers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34492.
- [15] Cheng S B, Tao S H, Zhang X Y, *et al.* Optical tweezers with fractional fractal zone plate[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 6100407.

- [16] Dai H T, Liu Y J, Sun X W. The focusing property of the spiral Fibonacci zone plate[C]. SPIE, 2012, 8257: 82570T.
- [17] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424: 810-816.
- [18] Luo Wei, Cheng Shubo, Yuan Zhanzhong, *et al.* Power-exponent-phase vortices for manipulating particles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1109001.  
罗伟, 程书博, 袁战忠, 等. 幂指数相位涡旋光束用于微粒操控[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1109001.
- [19] Hendrickson J, Richards B C, Sweet J, *et al.* Excitonic polaritons in Fibonacci quasicrystals[J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15382-15387.
- [20] Monsoriu J A, Calatayud A, Remon L, *et al.* Bifocal Fibonacci diffractive lenses[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3): 3400106.

## CRU 第三届世界光纤光缆大会 11 月将在武汉召开

光纤光缆市场目前正处在微妙的转折点——全球光纤入户大规模部署带来的需求逐渐被数据网的网络扩容和 5G 网络带来的光纤需求所替代。中国五大光纤光缆生产厂商总裁,包括长飞公司总裁庄丹、烽火公司总裁戈俊、亨通公司执行总裁钱建林、中天科技总裁薛驰及富通集团总裁肖玮,将于今年 11 月 1 日—3 日齐聚武汉的 CRU 世界光纤光缆大会,共话未来全球光纤光缆市场供应所面临的机遇与挑战。届时,中国互联网协会主席、中国工程院院士邬贺铨,中国电信总工程师兼执行董事韦乐平,也将作为演讲嘉宾与会,并预测下一代光纤光缆需求。

自 2015 年首次成功举办以来,CRU 世界光纤光缆大会的规模逐年扩大,今年大会再次选址中国武汉光谷,再次由光通信领域龙头企业——长飞公司协同主办。

作为全球光纤及光缆通信行业首屈一指的国际盛会,CRU 预计今年大会将迎来超过 700 名与会代表。届时,预制棒、光纤及通信电缆产品全球领先制造企业,与产业供应链相关的客户及服务商将齐聚一堂,共商行业发展,洽谈合作机遇。

中国是行业发展的先锋,武汉光谷也是了解光纤光缆行业最新发展趋势的不二之选。CRU 分析显示,2016 年中国光纤安装量占世界安装总量的 57%,光缆产量占全球总产量的 61%,光纤产量占全球总产量的 63%。截至 2016 年底,中国光纤入户的用户数量占世界总量的 57%。此外,中国拥有 9.41 亿个移动宽带用户。

本届 CRU 世界光纤光缆大会将重点探讨中国以及其他成熟电信市场的最新发展动向,以及光纤在行业发展新纪元中的重要地位。通过为期三天的会议,包括期间酒会、茶歇、午宴及答谢晚宴,世界光纤光缆大会将为业界同仁提供与世界各大光纤光缆制造企业决策者建立沟通渠道的最佳良机。

随着全球光纤入户大规模部署所引领的高需求逐渐被数据中心网络扩展和 5G 网络到来的新型光纤需求所替代,CRU 将 2017 年世界光纤光缆大会的主要议程放在光纤网络概念、产品需求及生产能力的重大变动等议题上。

三天的大会议程将使与会人员有机会了解快速发展的全球通信产业将如何影响光纤光缆贸易流向。

大会还将设立产品展区,展示影响行业供应链的最新科技解决方案及服务。注册参会代表还将有机会亲自现场参观中国某知名光纤光缆生产厂家。

大会官网:[www.worldopticalfibreconference.com](http://www.worldopticalfibreconference.com)