

利用多轴非对称结构光束的微球光学操控

陈君¹, 黄曾鑫², 匡登峰^{2*}

¹泰山学院物理与电子工程学院, 山东 泰安 271021;

²南开大学现代光学研究所天津微尺度光信息科学技术重点实验室, 天津 300350

摘要 设计了一种用于产生多轴非对称结构光束的新型多轴非对称指数型锥器件, 器件由非对称结构和多轴结构复合而成。利用理论计算、数值模拟和实验测量方法, 验证了多轴非对称结构光束在传播过程中会产生多个焦点并且具有独特的能流特性。利用这一特性设计并开展了利用聚焦多轴非对称结构光束操控聚苯乙烯荧光微球的实验, 结果表明, 多轴非对称结构光束使得聚苯乙烯微球在被捕获过程中表现出“加速-减速-再加速”的运动规律, 与模拟计算结果一致。多轴非对称指数型锥器件及其产生的多轴非对称结构光束在药物传输、微粒筛选等领域中有着重要的应用价值。

关键词 微纳光学; 微光学元件; 相位调制; 激光光束整形; 光学捕获; 光学操纵

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2413001

1 引言

光镊及其相关的光学操纵技术自从被提出以来, 已经在光阱、光结合^[1-2]、光控筛分^[3-4]和光力传输^[5]等应用中得到了广泛的研究, 成为了原子物理^[6]、生物科学^[7-10]、医学^[10]和化学^[11]等许多科学领域中的重要研究工具。经典的光镊技术通过高度聚焦的高斯激光束在焦点的梯度力^[12]捕获较大尺寸范围内的微观粒子^[13-14], 利用沿着传播方向的散射力传输微观粒子^[15]。为了提高光学操纵技术的捕获和操纵能力^[16], 研究者已经提出了纳米级别的等离子结构^[6,17]、超表面和超透镜^[18-19]、微纳光学元件^[20]、空间光调制器^[21]等方法。除了经典的高斯光束之外, 多种特殊模式的光束在光学捕获和操纵技术中的应用也得到了广泛研究。如拉盖尔高斯光束的空心焦场使其具有较高的轴向捕获效率, 可以有效地捕获金属微粒^[22]; 贝塞尔光束可以用于实现多平面、多微粒的同时操纵^[23]以及分选与运输微粒^[24], 贝塞尔光束对微粒朝光源方向的牵引作用也备受关注^[25]; 艾里光束的主瓣轨迹为抛物线, 理论

上可以驱动微粒沿抛物线轨迹运动^[26]。因此, 利用具有新颖传播特性的光束实现对微粒的特异性捕获、操纵是一种有重要的方法。

本文设计了一种新型的多轴非对称指数型锥器件 (Multi-Axis Asymmetric Exponential Cone, MAEC), 该器件可产生多轴非对称结构光束 (Multi-Axis Asymmetric Structured Beam, MASB), 并实现对介质微粒的多阶段捕获。利用 MATLAB 环境下编写的三维时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 方法, 对高斯光束经多轴非对称指数型锥器件调制后产生的多轴非对称结构光场进行了数值模拟。基于电磁场分布分析了光束的传播特性, 并计算了光束的能量流动规律以及介质微粒在光束作用下的受力情况。利用空间光调制器产生多轴非对称结构光束^[22], 搭建了针对聚苯乙烯荧光微球的光学操纵系统并开展了实验。数值模拟和实验结果共同证明了多轴非对称结构光束可以有效改变聚苯乙烯微球在被捕获过程中的运动状态, 为微粒筛分、微粒运输等技术提供了新的思路^[27], 在生物医药研究^[9,15]、精密测量^[28]等领

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-07-06

基金项目: 天津市自然科学基金(18JCZDJC38200)、南开大学-泰山学院合作项目(F1033851)

通信作者: *dfkuang@nankai.edu.cn

域有着重要的应用价值。

2 结构、方法和系统

2.1 多轴非对称指数型锥结构

多轴非对称指数型锥结构设计的基本思想是:关于光轴对称的以指数函数作为母线的非线性部分与以直线为母线的线性部分会产生非对称效应。光束在非线性部分出射时会产生随位置变化的折射角,从而导致光束的轨迹发生改变;同时,器件两部分的高度函数差会引起出射光束的

光程差,这些因素最终会造成出射光束在干涉过程中的相位差,产生能量偏移光轴的非对称光束。在一个器件中添加奇数个非对称组可以使结构具有多个对称轴,相应的出射光束会具有更复杂的多轴非对称特性。

为了更好地体现多轴非对称结构光束的特性并降低光操纵实验对激光功率的需求,本文中设置的多轴非对称指数型锥结构具有五个对称组,其结构如图 1(a)所示。在柱坐标系下,它的结构方程可以表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} (R - \rho) \times \frac{h_0}{R}, \frac{2M\pi}{5} < \theta \leq \frac{(2M+1)\pi}{5} \\ (R - \rho)^2 \times \frac{h_0}{R^2}, \frac{(2M+1)\pi}{5} < \theta \leq \frac{2(M+1)\pi}{5} \end{cases}, M=0,1,2,3,4, \quad (1)$$

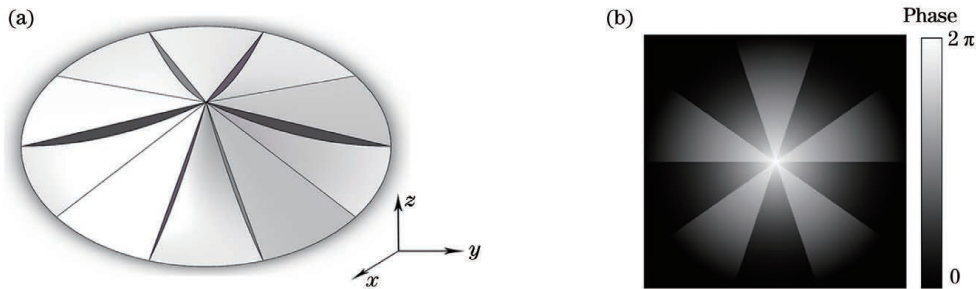


图 1 多轴非对称指数型锥结构。(a)示意图;(b)对应的相位掩模板

Fig. 1 Structure of MEAC. (a) Diagram; (b) corresponding phase mask

式中: $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为空间点在底面的投影到原点的距离; θ 为空间点在底面的投影和原点连线与 x 轴正半轴的夹角; R 为器件的底面圆的半径; $h_0 = \frac{\lambda}{n-1}$ 为锥体的高度,其中 λ 为入射光波长, n 为介质的折射率。在实验中,我们计算得到了指数型非对称锥结构对应的归一化相位掩模板,如图 1(b)所示。通过将相位掩模板投射到空间光调制器上,可以对入射光场进行相位调制,用显微物镜聚焦调制后得到的光束,进而进行光学操纵实验。

2.2 数值模拟方法

为了验证多轴非对称指数型锥结构参数对多轴非对称结构光束传输特性的影响,利用三维时域有限差分法,计算了多轴非对称指数型锥产生的多轴非对称结构光束的电磁场。模拟尺寸为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 网格尺寸为 20 nm , 以完全匹配层为模拟边界。多轴非对称指数型锥器件的底面半径 $R = 3.4 \mu\text{m}$, 高度 $h_0 = 1064 \text{ nm}$, 基底材料的折射率

$n = 1.5$, 入射光为波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的高斯光束,垂直器件底面照射。在数值模拟中,将结构表达式从柱坐标系下的形式转化为笛卡儿坐标系下的形式。在模拟计算得到的结果中,任意点的电磁场分布可以表示为 (\mathbf{E}, \mathbf{H}) , 坡印廷矢量计算方式为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{E} 为电场; \mathbf{H} 为磁场。按照目前主流的理论,电磁场中任意大小的微粒的时间平均受力^[16]为

$$\mathbf{F} = \int_{\sigma} \langle \mathbf{T} \rangle \cdot \mathbf{n} ds, \quad (3)$$

式中: \mathbf{T} 为麦克斯韦应力张量; \mathbf{n} 为表面法向量; $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均操作; ds 为面元; σ 为封闭的表面。麦克斯韦应力张量^[16]可以表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{DE} + \mathbf{BH} - \frac{1}{2}(\mathbf{B} \times \mathbf{H} + \mathbf{D} \times \mathbf{E})\mathbf{I}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{D} 为电位移; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{I} 是应力张量。根据上述分析,我们编写了对应的 MATLAB 程序并且分别计算了能流分布、光力分布和光力矩分布以研究多轴非对称结构光束对介质微球的作用。

2.3 实验系统

我们自主搭建了图 2 所示的实验系统来产生多轴非对称结构光束,并利用它对聚苯乙烯荧光微球进行操纵,其中 f 为焦距。首先用空间滤波器对固体激光器(MLL-III-532)出射的激光进行扩束,用透镜 L1($f=15\text{ cm}$)进行准直,之后用光阑 A1 调节光斑形状。为了利用空间光调制器对

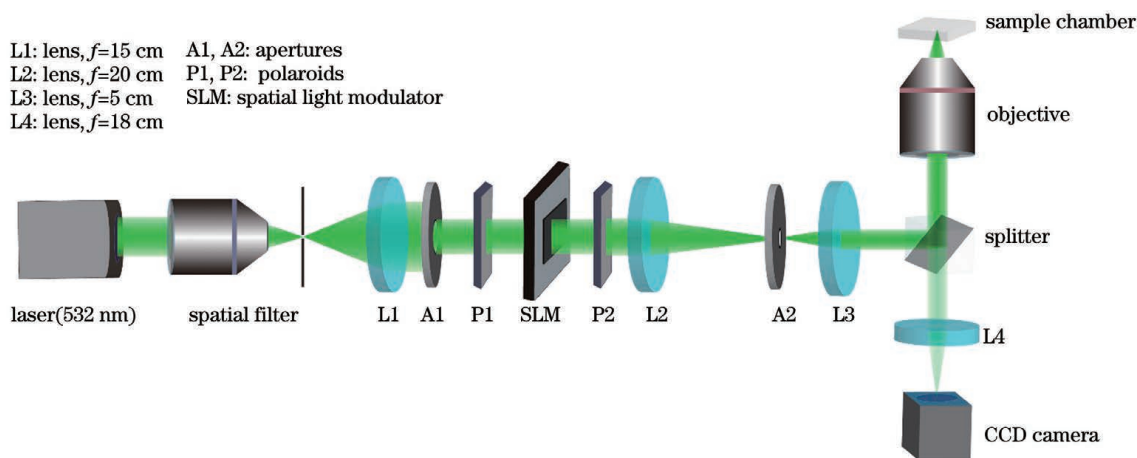


图 2 利用聚焦多轴非对称结构光束实现微球操纵的实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for optical manipulation of microsphere with MASB

调制后的光束经过间隔为 25 cm 的透镜组 L2 ($f=20\text{ cm}$)和 L3($f=5\text{ cm}$)后,光斑大小被调整为与显微物镜(放大倍率为 40, 数值孔径为 0.65)的数值孔径匹配。之后光束经分光镜反射进入显微物镜,再聚焦到样品池中激发出样品的荧光信号。被激发的荧光信号被同一个显微物镜收集,再次经过分光镜进入到成像光路中,经过滤光片(中心波长为 565 nm,长波通)后最终由 CCD 相机(像素尺寸为 2584 pixel \times 1936 pixel,像素尺寸为 2.2 μm)记录。在实验中,用于盛放样品的样品池由两片厚度为 0.2 mm 的盖玻片组成,盖玻片边缘粘连形成中空的腔体。用于实验的样品为质量浓度为 0.02 mg/mL 的聚苯乙烯荧光微球的水溶液,微球直径为 2 μm ,中心激发波长为 540 nm,中心发射波长为 580 nm。开展实验时,首先通过注射器将样品溶液注入到样品池中直至充满,并将样品池放置在载物台上。利用显微镜自带的光源调节物镜使聚苯乙烯微球清晰成像,此时微球运动应为无规则的运动或静止。之后,打开激光器并添加上滤光片,利用 CCD 相机记录实验结果。

3 分析与讨论

3.1 光场强度分布的模拟计算

通过模拟计算可以得到高斯光经过多轴非对称

入射光束进行相位调制,将多轴非对称指数型锥的高度函数转化为对应的相位掩模后投射到空间光调制器(RL-SLMT1,像素尺寸为 1024 pixel \times 512 pixel,像素间距为 26 μm)上。同时,在空间光调制器前后设置一对偏振方向垂直的线性偏振片 P1 和 P2 来保证空间光调制器的调制效率。

指数型锥后产生的多轴非对称结构光束的电磁场分布。通过分析不同传播距离处 xy 面内的光场强度分布,我们可以得到光束的传播特性,结果如图 3 所示。当光束传播距离为 $z=3\text{ }\mu\text{m}$ 时,光束的能量集中在集合中心的一个焦点上,焦点周围环绕着 5 个强度相对较低的焦点,如图 3(a)所示。当传播距离为 $z=4\text{ }\mu\text{m}$ 时,光束的能量相对均匀地分布到了 6 个焦点上,如图 3(b)所示。当传播距离为 $z=5\text{ }\mu\text{m}$ 时,光束的几何中心从点状转变为环状,周围 5 个焦点的能量变得更加均匀,如图 3(c)所示。随着传播距离的继续增加,光束的能量集中程度下降,无法满足对微球操控的能量需求。通过对光场强度的分析,可以基本确定多轴非对称结构光束的工作范围基本为 $z=3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.2 传播过程中的能流以及光力分析

为了更好地解释图 3(a)中的光场强度分布,我们结合模拟计算得到的电磁场分布和(2)式,计算了多轴非对称结构光束在传播过程中各距离处的坡印廷矢量分布,如图 4 所示。当光束传播距离为 $z=3\text{ }\mu\text{m}$ 时,由于锥结构的作用,光束的能量流动分为内外两个部分,并且均指向几何中心,这样就形成了图 3(a)中五强一弱的 6 个焦点。由于非线性部分对光束的偏折能力比线性部分强,当来自非线性部分的光束到达几何中心时,来自线性部分的光束还

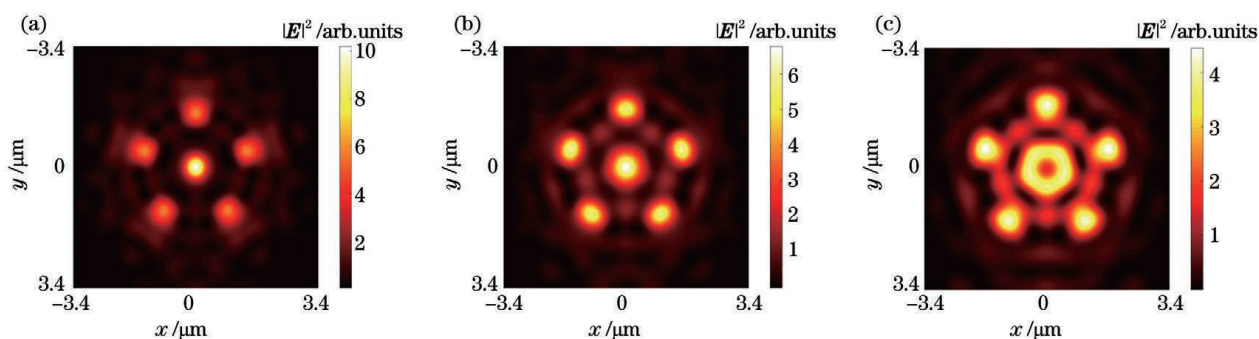


图 3 模拟计算得到的多轴非对称结构光束在 xy 面内的光场强度分布。(a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$
 Fig. 3 Simulated light field intensity distributions of MASB in xy plane. (a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$

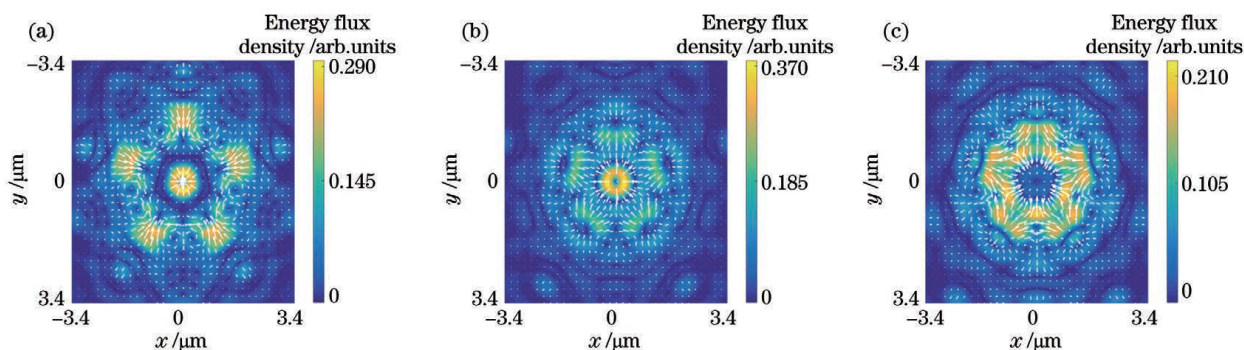


图 4 模拟计算得到的多轴非对称结构光束在 xy 面内的能流密度分布, 箭头表示能流方向。(a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$

Fig. 4 Simulated energy flux density distributions of MASB in xy plane with arrows indicating energy flux direction.
 (a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$

在相对外围的位置, 如图 4(a) 所示。当传播距离为 $z=4 \mu\text{m}$ 时, 光束几何中心的能量开始向外流动, 同时光束周围的能量向内流动, 如图 4(b) 所示。因此光束能量逐渐从中心和外部流到环状排布的 5 个焦点上, 从而出现了图 3(b) 所示的强度分布。当传播距离为 $z=5 \mu\text{m}$ 时, 光束的能量流动再次向指向中心, 并且光束的几何中心相对稳定, 能量变化大部分发生在光束外部, 如图 4(c) 所示。因此在光束传播过程中, 光束能量流动指向几何中心发生了两次,

并且在两次能量会聚的间隔处会形成一个环状的平衡位置。

为了研究多轴非对称结构光束对介质微球的作用, 我们还利用(3)式和(4)式计算了介质微球处于上述位置时受到的光力, 如图 5 所示。当光束传播距离为 $z=3 \mu\text{m}$ 时, 可以看到, 6 个焦点附近的微球的受力均指向焦点, 并且处于中心的焦点附近的微球明显受到更大的光力作用。此外, 处于外围的微球受到了指向各个焦点的力, 如图 5(a) 所示。

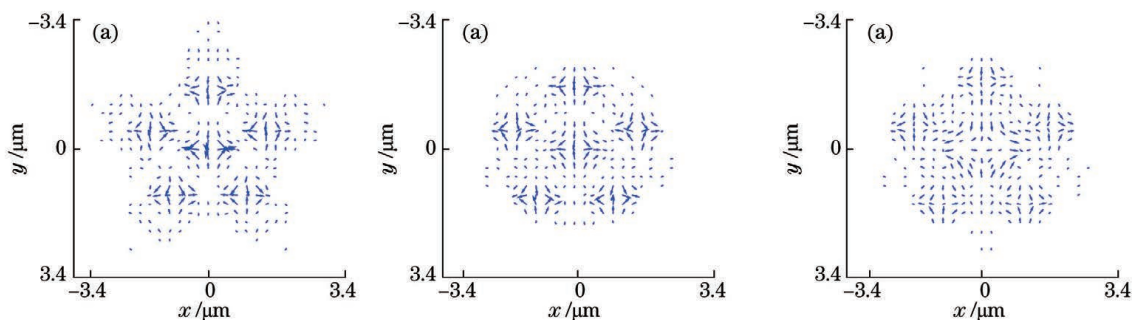


图 5 模拟计算得到的介质微球在多轴非对称结构光束作用下的受力情况, 箭头表示力方向。(a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$

Fig. 5 Simulated optical force of dielectric microspheres under effect of MASB with arrows indicating force direction.
 (a) $z=3 \mu\text{m}$; (b) $z=4 \mu\text{m}$; (c) $z=5 \mu\text{m}$

当传播距离为 $z=5\ \mu\text{m}$ 时,微球在各个焦点处的受力均匀,且在光力的作用下,微球可能在不同的焦点之间移动。从光力分析的结果我们可以初步得出,多轴非对称结构光束对微球运动的作用是为多个阶段的。

3.3 聚焦 MASB 的实验测量

在图 2 所示的实验系统中,多轴非对称结构光束经显微物镜聚焦之后到达样品池。由于聚焦和成像使用的是同一个显微物镜,当显微物镜将光束聚焦在样品池的下表面时,可以在 CCD 相机中接受到反射信息,从而得到显微物镜焦点处的光束能量分布。通过调节显微物镜,测量显微物镜焦面附近四个位置的光束强度分布,进而得到聚焦多轴非对称结构光束的传播特性。焦前 $-6\ \mu\text{m}$ 处 xy 面的光场强度分布如图 6(a) 所示,焦前 $-4\ \mu\text{m}$ 处 xy 面的光场强度分布如图 6(b) 所示,焦前 $-2\ \mu\text{m}$ 处 xy 面的光场强度分布如图 6(c) 所示。从传播特性来看,实验中测量得

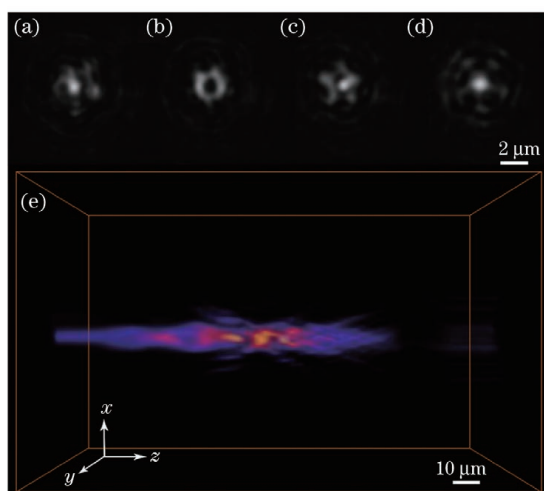


图 6 经显微物镜聚焦后的五阶非对称光束的光场强度分布。(a)~(d)显微物镜焦平面附近的光斑形状变化;(e)三维光场的空间分布

Fig. 6 Light field intensity distributions of fifth order asymmetric structured beam focused by microscope. (a)~(d) Change of light spot shape near focus plane of microscope; (e) 3D light field distribution

到的光束能量也呈现出从 6 个焦点到环状分布的变化,与模拟分析结果基本一致。但是因为实验中使用了显微物镜聚焦而模拟计算中没有,所以最终光束能量会集中到焦点上,如图 6(d) 所示。对整个焦点附近的区域进行扫描并且重建得到光场的三维空间分布,如图 6(e) 所示。可以明显看到,光束能量从多个方向会聚到焦点上,微球受到这些不同

轨道的光束的共同作用后会发生独特且复杂的运动。

3.4 利用聚焦 MASB 的介质微球操控实验

利用聚焦的多轴非对称结构光束操控聚苯乙烯荧光微球,实验结果如图 7 所示。在聚焦的多轴非对称结构光束的照射下,聚苯乙烯荧光微球向光束中心运动。一般的聚焦高斯光束对聚苯乙烯微球的梯度力使其向光束强度最大处运动,产生的散射力使其沿着光束传播方向运动。然而,由于聚焦多轴非对称结构光束独特的能量流动,聚苯乙烯微球的运动表现出独特的“加速-减速-再加速”运动规律。我们选取实验过程中两个连续的时间段(t_1 和 t_2)内的微球运动情况来说明这一现象,图 7(a) 显示了 A 号微球的完整运动过程,用来说明单个微球的运动规律;图 7(b) 显示了 B 号微球和 C 号微球的完整运动过程,用来说明两个彼此关联的微球的运动规律。

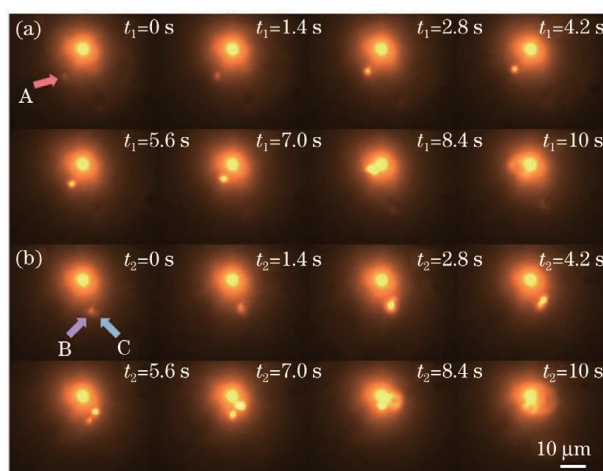


图 7 聚苯乙烯荧光微球在聚焦多轴非对称结构光束作用下的运动。(a) A 号微球的运动情况;(b) B 号和 C 号微球的运动情况

Fig. 7 Movements of polystyrene fluorescent microspheres under effect of focused MASB. (a) Movement of microsphere A; (b) movements of microspheres B and C

当聚焦多轴非对称结构光束照射到样品池中时,微球开始朝着光束中心加速运动,这主要是由焦点梯度力造成的,与图 5(a) 所示的模拟计算结果一致。随后微球朝光束中心运动的速度下降,并稳定在光束中心周围一定距离处,绕光束进行小角度旋转。这一现象证实了能流和光力的模拟过程中发现的平衡位置,微球的小角度旋转对应着不同焦点之间的能量流动,如图 4(b)、5(b) 所示。最终,微球脱离稳定状态再次加速进入光束中心,并在散射力的

推动下离开焦平面。我们计算了微球在运动过程中与光束中心的相对距离以进一步分析这一过程,如图 8 所示。微球的完整运动过程可以分为以下三部分:微球先从自由运动变为向光束中心运动,我们称为第一次吸引阶段(First attraction)。随后在约 3 s 的时间内,微球与光束中心的距离基本保持稳定,我们称为平衡位置(Equilibrium position),符合我们在图 7 中观察到的现象。另外,在三个不同时间段,来自不同方向的微球的平衡位置与光束中心的距离是基本相同的,这说明平衡位置是由光束的位置分布决定的。稳定状态结束之后,微球再次进入加速状态,接近光束中心,这一阶段被视为第二次吸引(Second attraction)。在第二次吸引中,微球的加速过程与第一次吸引的基本相同。值得注意的是,实验中三个微球在进入视野之前的运动状态都是不相同的,并且 B 号微球和 C 号微球的距离还非常接近,容易相互碰撞。但是三个微球进入光束范围之后以基本一致的方式接近光束中心,保持在稳定位置的时间间隔也基本相同。这说明在该过程中,聚焦多轴非对称光束的作用占主导,而其他因素比如微球进入方向、微球的初始状态等都难以影响微球“加速-减速-再加速”的运动规律。

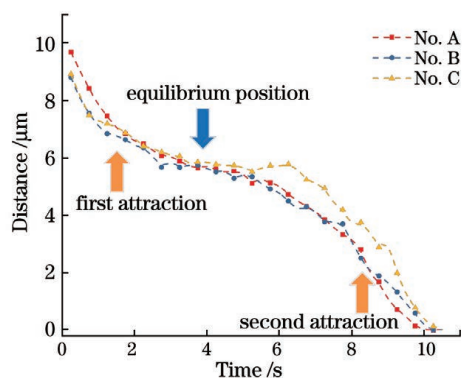


图 8 聚苯乙烯荧光微球与光束中心的距离随时间的变化

Fig. 8 Distance between polystyrene fluorescent microsphere and center of light beam versus time

4 结 论

提出了一种用于产生多轴非对称结构光束的具有五个对称轴的新型光学元件多轴非对称指数型锥结构,多轴非对称结构光束可以实现对介质微球的有效捕获。数值模拟计算结果和实验测量结果表明,多轴非对称结构光束具有独特的传播特性,包括分布状态呈多焦点与环状交替变化的光场强度、能流变化中出现的平衡稳定位置、对介质微球的连续

光力作用等。为了验证这些传播特性以及探究其应用潜力,自主设计并搭建了光学操纵和监测的实验系统,利用聚焦多轴非对称结构光束对聚苯乙烯荧光微球进行操纵实验。在聚焦多轴非对称结构光束的作用下,聚苯乙烯荧光微球呈现出一致的“加速-减速-再加速”运动规律,并且这一规律不受微球的运动方向和初始状态等因素的影响。区别于传统光镊技术利用光束焦点对微球的单纯梯度力作用,利用多轴非对称指数型锥产生多轴非对称结构光束的方法具有实验手段简单的特点,且介质微球的运动状态独特。所提方法为药物传输、生物研究、光控筛选、光传感等应用提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [2] Arita Y, Wright E M, Dholakia K. Optical binding of two cooled micro-gyroscopes levitated in vacuum [J]. *Optica*, 2018, 5(8): 910-917.
- [3] Pin C, Otsuka R, Sasaki K. Optical transport and sorting of fluorescent nanodiamonds inside a tapered glass capillary: optical sorting of nanomaterials at the femtonewton scale [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(5): 4127-4134.
- [4] Nan F, Yan Z J. Optical sorting at the single-particle level with single-nanometer precision using coordinated intensity and phase gradient forces [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 7602-7609.
- [5] Wang M M, Tu E, Raymond D E, et al. Microfluidic sorting of mammalian cells by optical force switching [J]. *Nature Biotechnology*, 2005, 23(1): 83-87.
- [6] Chang D E, Thompson J D, Park H, et al. Trapping and manipulation of isolated atoms using nanoscale plasmonic structures [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(12): 123004.
- [7] Ma X H, Wang S L, Liu W W, et al. Optimized stereo matching algorithm for integral imaging microscopy and its potential use in precise 3-D optical manipulation [J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 374-379.
- [8] Fazal F M, Block S M. Optical tweezers study life under tension [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 318-321.
- [9] Xie S, Du Y, Zhang Y, et al. Aptamer-based optical manipulation of protein subcellular localization in cells [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1347.
- [10] Liang Y S, Yao B L, Lei M. Applications of

- holographic optical tweezers in biological research[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207020.
梁言生, 姚保利, 雷铭. 全息光镊在生物学研究中的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207020.
- [11] Peng T, Li R Z, An S, et al. Real-time optical manipulation of particles through turbid media [J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4858-4866.
- [12] Ghosh S, Ghosh A. Next-generation optical nanotweezers for dynamic manipulation: from surface to bulk[J]. Langmuir, 2020, 36(21): 5691-5708.
- [13] Juan M L, Righini M, Quidant R. Plasmon nano-optical tweezers[J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 349-356.
- [14] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, et al. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(23): 231110.
- [15] Minin I V, Minin O V. Recent trends in optical manipulation inspired by mesoscale photonics and diffraction optics[J]. Journal of Biomedical Photonics & Engineering, 2020, 6(2): 020031.
- [16] Gao D, Ding W, Nieto-Vesperinas M, et al. Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects [J]. Light, Science & Applications, 2017, 6(9): e17039.
- [17] Ghosh S, Ghosh A. All optical dynamic nanomanipulation with active colloidal tweezers [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4191.
- [18] Ivinskaya A, Kostina N, Proskurin A, et al. Optomechanical manipulation with hyperbolic metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(11): 4371-4377.
- [19] Tkachenko G, Stellinga D, Ruskuc A, et al. Optical trapping with planar silicon metalenses [J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3224-3227.
- [20] Huang Z X, Kong W C, Kuang D F. Arrangement of micro dielectric particles with vector vortex beam generated by dual-helical dielectric cone [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(5): 1-8.
- [21] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, et al. Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0309001.
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0309001.
- [22] Dienerowitz M, Mazilu M, Reece P J, et al. Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles [J]. Optics Express, 2008, 16(7): 4991-4999.
- [23] Garcés-Chávez V, McGloin D, Melville H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.
- [24] Carruthers A E, Walker J S, Casey A, et al. Selection and characterization of aerosol particle size using a Bessel beam optical trap for single particle analysis [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(19): 6741-6748.
- [25] Li X, Chen J, Lin Z, et al. Optical pulling at macroscopic distances[J]. Science Advances, 2019, 5(3): eaau7814.
- [26] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Ballistic dynamics of Airy beams [J]. Optics Letters, 2008, 33(3): 207-209.
- [27] Liang Y S, Yao B L, Lei M, et al. Optical micro manipulation based on spatial modulation of optical fields [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1026003.
梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026003.
- [28] Han X, Chen X L, Xiong W, et al. Vacuum optical tweezers system and its research progress in precision measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401011.
韩翔, 陈鑫麟, 熊威, 等. 真空光镊系统及其在精密测量中的研究进展 [J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401011.

Optical Manipulation of Micro-Particles with Multi-Axis Asymmetric Structured Beam

Chen Jun¹, Huang Zengxin², Kuang Dengfeng^{2*}

¹ *School of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Taishan, Shandong 271021, China;*

² *Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China*

Abstract

Objective Recently, optical tweezers and related optical manipulation technologies have been extensively studied. One important method to improve the capability of optical manipulation is to use structured beams with novel propagation properties to realize specific capture and manipulation of particles. Here, we propose a new type of multi-axis asymmetric exponential cone device composed of an asymmetric structure and a multi-axis structure for generating multi-axis asymmetric structured beams. These beams are proved to be effective to give the dielectric microspheres a unique ‘accelerating-decelerating-reaccelerating’ movement and provide new ideas and implementation methods for particle screening and transporting.

Methods The multi-axis asymmetric exponential cone is designed with the geometrical optics theory and the diffractive optics theory. The modulating effects of such a device are produced by the different height distribution functions of its two asymmetric parts, which causes the redirection of the wave vector and influences the phase difference during propagation. With the three-dimensional finite-difference time-domain simulations, the electromagnetic field distribution of the multi-axis asymmetric structured beam is obtained. Also, the energy flux distribution and the optical force distribution of dielectric microspheres are investigated based on the electro-magnetic field distributions of these beams. Moreover, the measurement of a focused multi-axis asymmetric structured beam and the manipulation of polystyrene fluorescent microspheres are conducted with our home-made experimental system to study the application potential in optical manipulation. The spatial light modulator and the phase mask of the device are employed to generate a multi-axis asymmetric structured beam in experiments.

Results and Discussions From the simulation results, the multi-axis asymmetric structured beam shows an alternation of multiple focal points and a ring-shaped focal pattern during propagation, possessing unique energy flow characteristics. There are two processes in which the beam energy flows to the geometric center, thus a ring-shaped equilibrium position is formed between the two energy convergences, as shown in Fig. 3. The optical force distribution demonstrates that the optical force on microspheres at each secondary focal point is basically uniform, indicating that the microspheres may move between different secondary focal points, as shown in Figs. 4 and 5. The capture of microparticles can be divided in two parts: one is from free space to the secondary focuses, and the other is from the secondary focus to the geometric center, indicating that the dielectric microspheres move in multi-stages under the effect of the focused multi-axis asymmetric structured beam. In experiment, when the focused multi-axis asymmetric structured beam is irradiated into the sample cell, the microsphere starts to accelerate toward the beam center, which is mainly caused by the focal gradient force. Then the speed of the microsphere moving toward the beam center decreases, and the distance between the microsphere and the beam center keeps stable for several seconds. This phenomenon confirms the equilibrium position found in our simulation results of energy flow and optical force. The small-angle rotation of the microsphere corresponds to the energy flow between different focal points. Eventually, the microsphere accelerates toward the beam center again, and leaves the focal plane driven by the scattering force. The whole process can be seen in Fig. 7. The experimental results show that multi-axis asymmetric structured beams cause the ‘accelerating-decelerating-reaccelerating’ movement of polystyrene microspheres during the trapping process, which is consistent with the simulated results, as shown in Fig. 8.

Conclusions In this paper, we propose a new type optical element, i. e. multi-axis asymmetric exponential cone, to generate multi-axis asymmetric structured beams, which can effectively capture and manipulate dielectric microspheres. Theoretical calculations, numerical simulations, and experimental measurement results show that the multi-axis asymmetric structured beam has unique propagation properties, including alternation of multiple focuses

and ring-shaped focal patterns during propagation, equilibrium positions appearing in energy flow, and continuous light force on dielectric microspheres. In order to verify these propagation properties and explore the application potential, an independently designed experimental system for optical manipulation and monitoring is constructed using the focused multi-axis asymmetric structured beams to manipulate polystyrene fluorescent microspheres. Under the effect of the focused multi-axis asymmetric structured beam, the polystyrene fluorescent microspheres show a consistent ‘accelerating-decelerating-reaccelerating’ movement, and this movement is not affected by the initial motion direction of the microspheres, the initial speed, and other environmental factors. Different from the traditional optical tweezer technology that uses the gradient force of the focus to capture microspheres, the proposed method using the multi-axis asymmetric exponential cone to generate the multi-axis asymmetric structure of the beam provides a simple experimental implementation to give the dielectric microspheres a unique movement. This technology provides a new idea for applications in such as drug delivery, biological research, light-controlled screening, and light sensing.

Key words micro and nano optics; micro-optical devices; phase modulation; laser beam shaping; optical trapping; optical manipulation

OCIS codes 070.6120; 140.3300; 350.4855