

基于 4π 聚焦系统提高光学捕获稳定性

徐华锋*, 崔巍, 张洲

安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001

摘要 光镊技术是利用高度聚焦的激光束所形成的梯度力势阱对微纳粒子进行捕获和操控的技术,在生物、物理、化学和医学等领域有着非常广泛的应用。基于 4π 聚焦系统,理论研究了径向偏振高斯光束的紧聚焦特性及其对金属微粒的辐射力,并与传统的单透镜聚焦系统结果进行比较;还详细讨论了不同离焦和离轴距离对光阱刚度的影响。研究表明,与传统的单透镜聚焦系统相比, 4π 聚焦系统通过选择合适的光学参量,可以获得具有三维球形结构的聚焦光斑,显著增大了横向和纵向的梯度力,从而显著增强光镊系统捕获金属微粒的稳定性。

关键词 物理光学; 光镊; 光学捕获力; 4π 聚焦系统; 光阱刚度

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102601

Enhancement of Optical Trapping Stability Based on 4π Focusing System

Xu Huafeng*, Cui Wei, Zhang Zhou

School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology,
Huainan, Anhui 232001, China

Abstract Optical tweezer has become a powerful and flexible tool for trapping and manipulating the micro-nano particles through a gradient force well formed by a highly focused laser beam, and it has a wide applications in the fields of biology, physics, chemistry, and medicine. Based on the 4π focusing system, the tight focusing characteristics of the radially polarized Gaussian beam and its radiation force to the metal particles are theoretically studied and compared with the results of traditional single-lens focusing system. Furthermore, the influence of the off-focus distance and the off-axis distance on the trap stiffness is also investigated in detail. Numerical results show that a focal spot with three-dimensional and spherical structure can be obtained in the 4π focusing system via the suitable parameters. This spherical focal spot can largely enhance the transverse and longitudinal trapping forces, and consequently enhance the trapping stability of metal particles of optical tweezer system.

Key words physical optics; optical tweezers; optical trapping force; 4π focusing system; trap stiffness

OCIS codes 350.4855; 290.5870; 260.5430

1 引言

激光光镊是运用激光作为技术手段来实现对微纳尺度颗粒、生物大分子、细菌等单个微小物体的捕获与操控,具有非接触、无损伤和精确定位等特点,并且可以测量所操控物体的微小力和实时跟踪所操控的物体,因此在生物、物理、化学和医学等领域有着非常广泛的应用^[1-7]。光镊技术不仅实现了对

DNA分子的扭转与打结、蛋白质的折叠与去折叠等精细操作,还可以应用于抗癌药物的研究中^[4-5]。此外,光镊技术使得生物医学分子或细胞的生命过程成为人为可控,是探索生命运动规律的重要研究手段之一。Zhong等^[6]应用光镊技术成功地捕获与操控活体动物的红细胞,首次实现了人为制造的血管堵塞和实施非接触式的血管疏通,这一研究成果说明光镊技术开拓了活体研究的新领域,为活体研

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金理论物理专项(11747065)、安徽省自然科学基金(1808085QA10)、国家级大学生创新创业训练计划(201710361092)

* E-mail: xhfeng716@126.com

究和临床诊断提供了一种全新的技术手段。

传统光镊技术是利用普通的激光束作为光镊光源,在高数值孔径物镜的紧聚焦条件下实现对微粒的捕获与操控^[1]。由于受到光学衍射极限等因素的制约,普通的激光束只能形成波长量级的聚焦光斑,导致传统光镊在微粒的捕获与操控方面存在不稳定性与功能单一性等问题,从而严重限制了光镊技术在纳米科学和生命科学中的研究和应用^[3]。解决传统光镊的这一系列棘手问题的关键是要突破衍射极限的亚波长深度聚焦,对所需的目标焦场进行设计与调控^[7]。

矢量光束是一种非均匀的偏振光,其横截面上每一点的偏振状态不尽相同。矢量光束的偏振态在光场时空演化以及与其他物质相互作用中起着十分重要的作用^[8-9]。通过对入射光束的偏振态进行调控,可产生一些具有特殊偏振方向和场强分布的聚焦光场(如光笼、光针、光链和平顶光场等),此聚焦光场在光学数据存储、光学探针和光学捕获等领域有着广泛的应用前景^[9-17]。此外,矢量光束具有独特的聚焦性质,可结合各种新型的矢量聚焦光场来实现一些特殊或复杂的操控功能,这也是新型光镊的发展趋势^[10-13]。

有研究表明,聚焦光斑的大小与聚焦透镜的数值孔径有关,数值孔径越大,所产生的聚焦光斑越

小。相对于单透镜聚焦系统,由两个共焦的高数值孔径物镜组合而成的 4π 聚焦系统可以产生更小的聚焦光斑。由于左右两侧聚焦光束的相干作用,聚焦后的光束结构会随着入射光束的振幅、相位以及偏振状态的改变而发生重组。通过选取合适的光学参量,可以在 4π 聚焦系统的焦点附近获得高亮度的单光球或者多光球、三维的光学囚笼和光链等结构^[18-24]。本文基于 4π 聚焦系统,研究了径向偏振高斯光束的对向紧聚焦特性,并分析了其对金属瑞利粒子的辐射力。研究表明,相比于传统的单透镜聚焦系统, 4π 聚焦系统可以形成具有三维球形结构的聚焦光斑,极大地增强了横向和纵向的梯度力,从而提高了金属微粒三维捕获的稳定性。该研究结果对光学捕获的实验研究具有重要的参考价值。

2 理论模型

2.1 4π 聚焦系统理论模型

图1分别给出了单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统的原理示意图,虚线箭头表示电场的瞬时矢量。从图1(b)可以看到, 4π 聚焦系统中采用两个高数值孔径物镜来将光束聚焦于同一点,两边相对传输的横向聚焦光束的相位差为 π ,因此两侧光束的相干作用可以增强光场的纵向分量,形成更小的聚焦光斑。

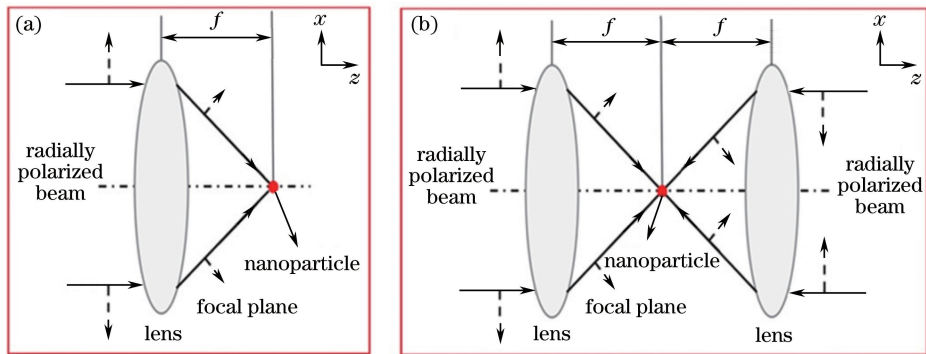


图1 聚焦原理示意图。(a)单透镜聚焦系统;(b) 4π 聚焦系统

Fig. 1 Schematics of focusing system. (a) Single-lens focusing system; (b) 4π focusing system

根据 Richards-Wolf 矢量衍射理论^[25],在柱坐标系中,径向偏振光束通过单个高数值孔径物镜聚焦后,焦点附近的电场可以表示为

$$E_r(r, z) = A \int_0^\alpha \cos^{1/2} \theta \sin(2\theta) l(\theta) J_1(k_1 r \sin \theta) \cdot \exp(ik_1 z \cos \theta) d\theta, \quad (1)$$

$$E_z(r, z) = -2iA \int_0^\alpha \cos^{1/2} \theta \sin^2 \theta \cdot l(\theta) J_0(k_1 r \sin \theta) \cdot \exp(ik_1 z \cos \theta) d\theta, \quad (2)$$

式中: $E_r(r, z)$ 为径向电场分量; $A = E_0 \pi f n_1 / \lambda$ 是一个关于焦距 f 的常量, n_1 为浸液的折射率, λ 为激光的波长, E_0 为电场的幅值,与入射光束的能量有关; θ 为极坐标系的极角; $l(\theta)$ 为入射光束在入瞳处的振幅函数,表征出射光瞳的振幅和相位分布关系; $J_m(\cdot)$ 是第一类 m 阶贝塞尔函数;波数 $k_1 = 2\pi n_1 / \lambda$;积分上限 $\alpha = \arcsin(NA/n_1)$ 为光束聚焦的最大会聚角, NA 为透镜的数值孔径; $E_z(r, z)$ 为

轴向电场分量。在衍射场中角向偏振的电场分量恒为零,但可以产生角向偏振的磁场分量。根据麦克斯韦方程组的相关推导,角向磁场分量可以表示为^[26]

$$H_{\varphi}(r, z) = \frac{2An_1}{\mu_0 c} \int_0^{\alpha} \cos^{1/2} \theta \sin \theta \cdot l(\theta) J_1(k_1 r \sin \theta) \exp(ik_1 z \cos \theta) d\theta, \quad (3)$$

式中: c 为真空中的光速; μ_0 为真空中的磁导率。采用径向偏振高斯光束(R-TEM₀₁^{*})作为入射光束,其入瞳处的振幅函数可以表示为^[27]

$$l(\theta) = \beta^2 \frac{\sin \theta}{\sin^2 \alpha} \exp\left[-\left(\beta \frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中: β 为入射光束的截断参数,其定义为瞳孔半径与光束束腰的比值。根据光场的叠加原理,入射光束通过 4π 聚焦系统聚焦后在焦点附近形成的总电场和总磁场分别为^[27]

$$\mathbf{E}(r, \theta, z) = \mathbf{E}_1(r, \theta, z) + \mathbf{E}_2(-r, \theta, -z), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}(r, \theta, z) = \mathbf{H}_1(r, \theta, z) + \mathbf{H}_2(-r, \theta, -z), \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}_1 和 \mathbf{H}_1 、 \mathbf{E}_2 和 \mathbf{H}_2 分别表示左入射光束和右入射光束的聚焦电场和磁场。

2.2 辐射力理论模型

假设焦点附近有一个半径为 a ($a \ll \lambda$)的球形金属瑞利微粒,该微粒在光场极化下形成一个电偶极矩^[28]。因此可利用偶极子的相关理论来近似计算微粒所受到的辐射力大小。根据瑞利散射理论,作

用于微粒上的辐射力可以分为梯度力 F_g 、散射力 F_s 和吸收力 F_a ,分别表示为^[11,28]

$$F_g = \text{Re}(\gamma) \epsilon_0 \nabla |\mathbf{E}(r, z)|^2 / 4, \quad (7)$$

$$F_s = n_1 \langle \mathbf{S} \rangle C_{\text{scat}} / c, \quad (8)$$

$$F_a = n_1 \langle \mathbf{S} \rangle C_{\text{abs}} / c, \quad (9)$$

式中: $\gamma = 4\pi a^3 \epsilon_1 (\epsilon_2 - \epsilon_1) / (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)$ 为微粒的极化率, ϵ_2 与 ϵ_1 分别为微粒和周围介质的相对介电常数; $C_{\text{scat}} = k^4 |\gamma|^2 / 6\pi$ 和 $C_{\text{abs}} = kn_1 \text{Im}(\gamma) / \epsilon_1$ 分别为散射与吸收的横截面面积;聚焦径向偏振光束的时间平均坡印亭矢量可以表示为^[11,28]

$$\langle \mathbf{S} \rangle = [\text{Re}(E_r H_{\theta}^*) \mathbf{e}_z - \text{Re}(E_z H_{\theta}^*) \mathbf{e}_r] / 2, \quad (10)$$

式中: H_{θ}^* 为角向磁场分量的复共轭。

3 数值结果与讨论

为了保证计算参数的可取性,选取聚焦透镜的数值孔径为 $0.999n_1$;浸液为水,其折射率 $n_1 = 1.332$;激光的波长 $\lambda = 1.047 \mu\text{m}$,能量为 100 mW ;光束的截断参数 $\beta = 1.271$;金属瑞利粒子的半径为 19.1 nm ,相对介电常数 $\epsilon_2 = -54 + 5.9i$ ^[29]。所有的长度均以波长为单位。为了比较单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统的聚焦特性,计算得到径向偏振高斯光束在两种聚焦系统下的聚焦光强分布(图2)。图2(a)和(b)分别是在单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统下 $r-z$ 平面内的光强分布,图2(c)和(d)分别为两种聚焦系统的焦平面内相应的径向和轴向光强及总光

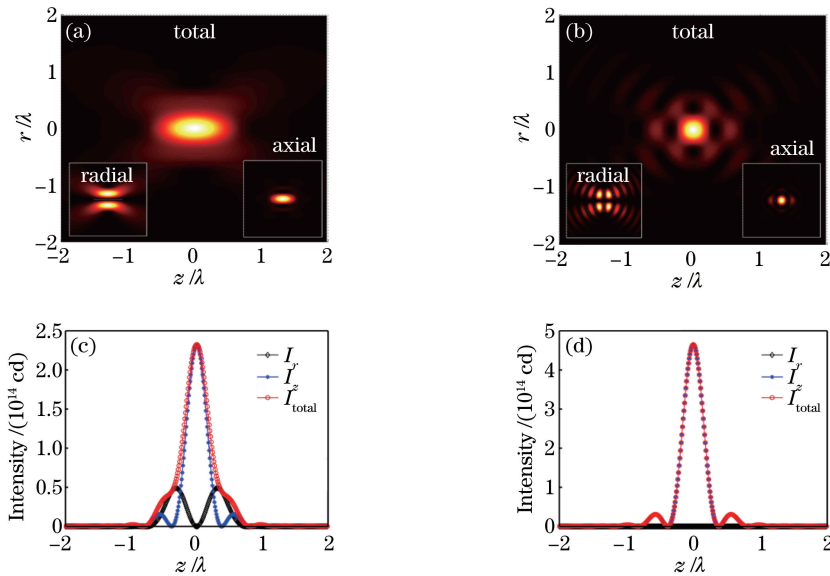


图2 聚焦系统的光强分布。(a)、(b) $r-z$ 平面内的光强分布;(c)、(d)焦平面上相应的径向和轴向光强及总光强

Fig. 2 Light intensity distribution of focusing systems. (a), (b) Contour plots of intensity in the $r-z$ plane;

(c), (d) radial intensity I_r , axial intensity I_z , and the total intensity I_{total} in the focal plane

强。与单透镜聚焦系统相比, 4π 聚焦系统中两个具有 π 相位差的反向入射光束相互干涉, 导致聚焦光场中的轴向分量得到显著增强, 而径向分量明显减弱, 从而形成了一个超越衍射极限的球形聚焦光斑。这种球形聚焦光斑可以极大地增强微粒捕获的稳定性, 下面将研究该聚焦光场对金属瑞利粒子的辐射力。

图 3 所示为两种聚焦系统中金属瑞利粒子在焦平面以及不同离焦距离 z 时所受的总横向捕获力 $F_t = (F_{g,t} + F_{s,t} + F_{a,t})$ 的分布情况。从图 3 可以看

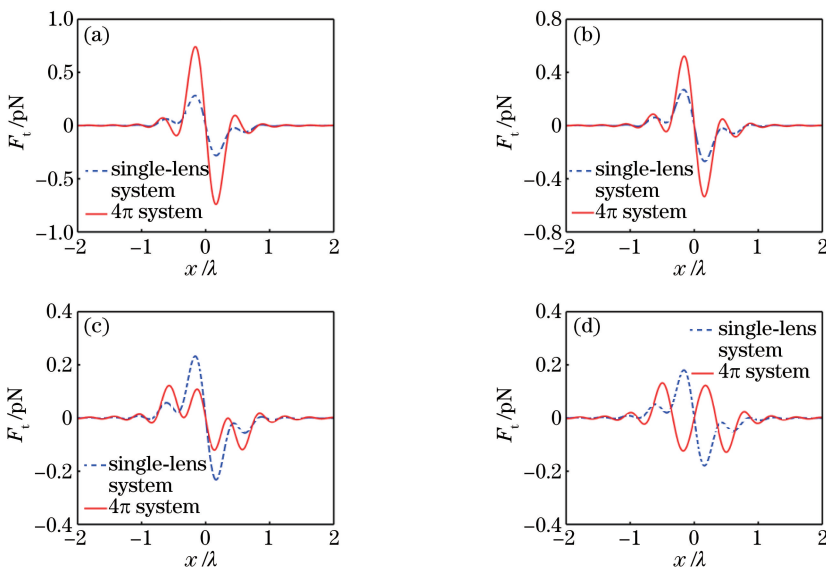


图 3 单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统的金属瑞利粒子在不同离焦距离 z 处受到的横向捕获力 F_t 。

(a) $z=0$; (b) $z=0.1\lambda$; (c) $z=0.2\lambda$; (d) $z=0.3\lambda$

Fig. 3 Total transverse trap force F_t acting on a metallic Rayleigh particle at different off-focus distances z in the single-lens focusing system and the 4π focusing system. (a) $z=0$; (b) $z=0.1\lambda$; (c) $z=0.2\lambda$; (d) $z=0.3\lambda$

图 4 所示为两种聚焦系统中金属瑞利粒子在光轴上以及不同离轴距离时所受的纵向梯度力 $F_{g,1}$, 纵向吸收力与散射力之和 ($F_{a,1} + F_{s,1}$) 以及总纵向捕获力 $F_l = (F_{g,1} + F_{a,1} + F_{s,1})$ 的分布情况。由图 4 可知, 4π 聚焦系统所产生的纵向梯度力远大于单透镜聚焦系统。除此之外, 两种聚焦系统所产生的纵向吸收力和散射力分布也明显不同。当粒子位于光轴上时 ($x=0$), 其受到的纵向吸收力与散射力都为零, 两种聚焦系统都能在焦点处稳定捕获到粒子。而当粒子处于离轴位置时 (如 $x=0.1\lambda$), 其受到的纵向吸收力与散射力之和不再为零, 在 4π 聚焦系统中, 粒子受到的纵向吸收力与散射力之和沿着光轴方向呈现出中空型分布, 而在单透镜聚焦系统中则呈现出尖峰型分布。这是由于 4π 聚焦系统中对向聚焦光束在焦点附近产生的散射力和吸收力相互抵

出, 当粒子处于焦平面上或离焦平面较近时, 两种聚焦系统都能够在光轴上俘获微粒, 且 4π 聚焦系统所产生的横向捕获力更大。但当微粒与焦平面的距离逐渐变大时, 4π 聚焦系统在横向上的捕获力迅速变小, 甚至丧失了捕获能力 (如 $z=0.3\lambda$ 时), 而单透镜聚焦系统却仍然能够捕获微粒。这说明了 4π 聚焦系统能够大幅度地增强横向捕获力, 但也会相应地缩小其纵向的捕获范围, 这主要是聚焦光斑的尺寸较小的缘故。

消, 因此粒子在焦平面处只会受到纵向梯度力的作用。 4π 聚焦系统的这种光学捕获特性有助于消除在捕获离轴粒子时所产生的平衡位置偏移的现象, 从而提高了对捕获微粒的定位能力。

除光学捕获力外, 光阱刚度的大小也能直接反映捕获微粒的稳定性。横向和纵向光阱刚度可以分别为 $\kappa_t = |\partial F_t / \partial x|_{x_{\text{equ}}}$, $\kappa_l = |\partial F_l / \partial z|_{z_{\text{equ}}}$ [29]。图 5 所示为两种聚焦系统的不同空间位置时所对应的横向和纵向的光阱刚度。可以看出, 4π 聚焦系统的横向光阱刚度远大于单透镜聚焦系统, 但 4π 聚焦系统的横向捕获范围远小于单透镜聚焦系统。此外, 4π 聚焦系统的纵向光阱刚度远大于单透镜聚焦系统。这些结果表明, 与传统的单透镜聚焦系统相比, 4π 聚焦系统能极大地增强横向和纵向的光阱刚度, 从而实现了金属瑞利粒子稳定的三维捕获。

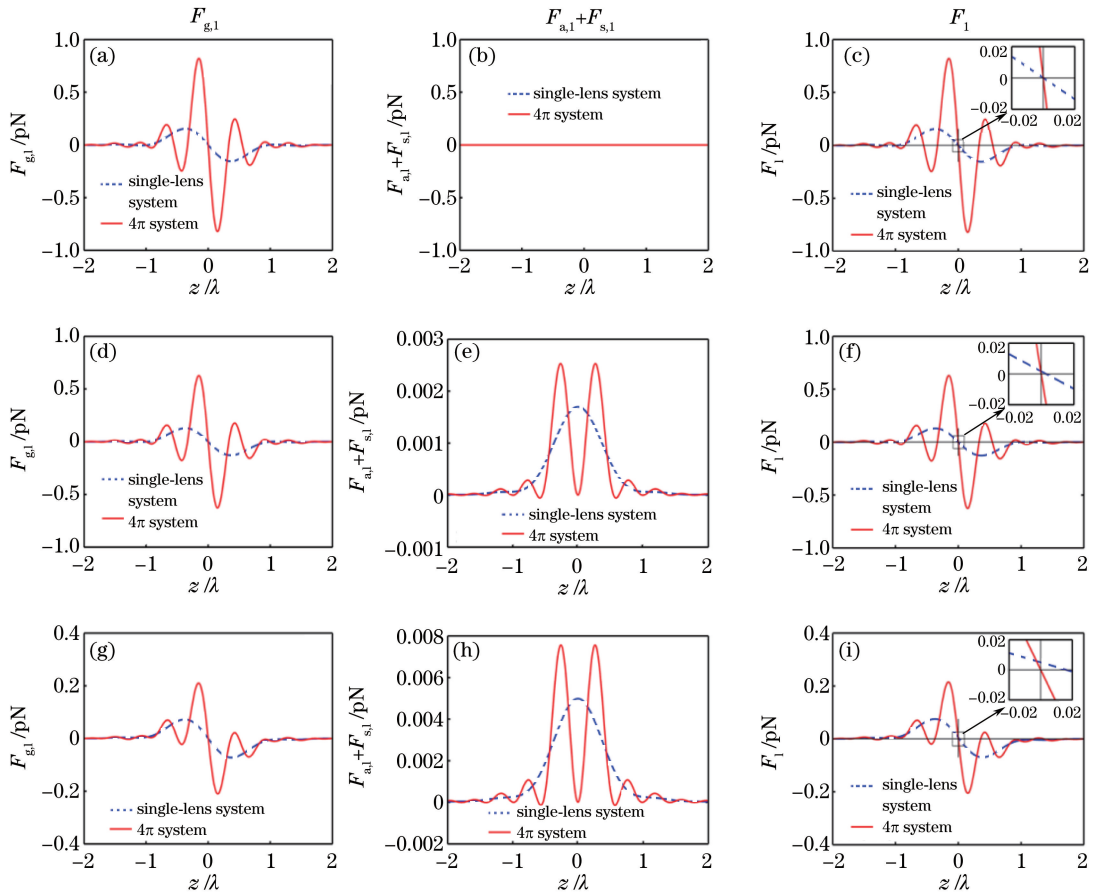


图4 单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统中金属瑞利粒子在不同离轴距离处受到的纵向捕获力。

(a)~(c) $x=0$; (d)~(f) $x=0.1\lambda$; (g)~(i) $x=0.2\lambda$

Fig. 4 Longitudinal trap force acting on a metallic Rayleigh particle for different off-axis distances in the single-lens focusing system and the 4π focusing system. (a)-(c) $x=0$; (d)-(f) $x=0.1\lambda$; (g)-(i) $x=0.2\lambda$

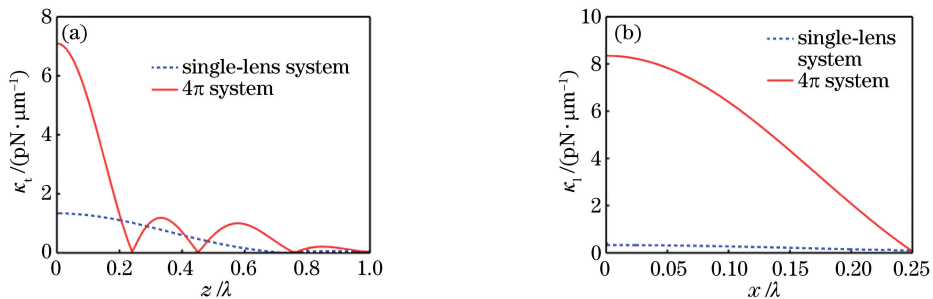


图5 单透镜聚焦系统和 4π 聚焦系统中金属瑞利粒子的光阱刚度。(a)横向光阱刚度;(b)纵向光阱刚度

Fig. 5 Trap stiffness of a metallic Rayleigh particle in the single-lens focusing system and the 4π focusing system. (a) Transverse trap stiffness; (b) longitudinal trap stiffness

4 结 论

提出一种能够切实提高金属微粒捕获稳定性的新方法。利用 4π 聚焦系统,将两束相位差为 π 的径向偏振高斯光束进行对向聚焦,可产生具有三维结构的球形聚焦光斑,并分析该聚焦光斑对微粒的捕获能力。研究表明,与传统单透镜聚焦系统相

比, 4π 聚焦系统能够显著增大横向和纵向的梯度力,产生较大的三维光阱刚度,从而提高金属微粒的捕获稳定性。本研究拓宽了光镊的研究和应用范围,对光学捕获的实验研究具有一定的参考价值。

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]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [2] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [3] Dholakia K, Reece P, Gu M. Optical micromanipulation[J]. *Chemical Society Reviews*, 2008, 37(1): 42-55.
- [4] Ziegler F, Lim N C, Mandal S S, *et al.* Knotting and unknotting of a protein in single molecule experiments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(27): 7533-7538.
- [5] Li S X, Chen G, Zhang Y J, *et al.* Identification and characterization of colorectal cancer using Raman spectroscopy and feature selection techniques [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25895-25908.
- [6] Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, *et al.* Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1768.
- [7] 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.
- [8] Guo Z H, Liu Z T, Chen Q M, *et al.* Application and progress of laser shaping devices in optical tweezers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090004.
郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 等. 激光整形器件在光镊中的应用及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090004.
- [9] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [10] Wang X L, Chen J, Li Y N, *et al.* Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253602.
- [11] Zhang Y J, Ding B F, Suyama T. Trapping two types of particles using a double-ring-shaped radially polarized beam [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(2): 023831.
- [12] Huang L, Guo H L, Li J F, *et al.* Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1694-1696.
- [13] Li M M, Yan S H, Yao B L, *et al.* Spinning and orbiting motion of particles in vortex beams with circular or radial polarizations [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20604-20612.
- [14] Liu X N, Wang J M, He C J, *et al.* Backward focus engineering with controlled cylindrical vector beams under different numerical apertures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114004.
刘雪宁, 王吉明, 赫崇君, 等. 不同数值孔径下调控矢量光束聚焦场的反向构建[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114004.
- [15] Liu J, Yang Y F, He Y, *et al.* Flattop beam creation based on strong focusing of circularly polarized vortex beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0526003.
刘键, 杨艳芳, 何英, 等. 基于圆偏振涡旋光束强聚焦的平顶光束的构成[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0526003.
- [16] Gong H X, Jia X T, Tao J, *et al.* Generating of vector vortex beams based on Mach-Zender interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0105001.
宫洪旭, 贾信庭, 陶珺, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪生成矢量涡旋光束[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0105001.
- [17] Xu Q, Li J G, Wang X, *et al.* Scattering properties of vectorial far-field Laguerre-Gaussian beam by single spherical particle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0605003.
徐强, 李金刚, 王旭, 等. 拉盖尔高斯光束矢量远场单球粒子的散射特性[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0605003.
- [18] Bokor N, Davidson N. Toward a spherical spot distribution with 4π focusing of radially polarized light[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 1968-1970.
- [19] Chen W B, Zhan Q W. Creating a spherical focal spot with spatially modulated radial polarization in 4Pi microscopy[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2444-2446.
- [20] Yan S H, Yao B L, Rupp R. Shifting the spherical focus of a 4Pi focusing system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 673-678.
- [21] Chen Z Y, Zhao D M. 4Pi focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1286-1288.
- [22] Chang Q, Yang Y F, He Y, *et al.* Study of the focusing features of spatial amplitude and phase modulated radially polarized vortex beams in a 4pi focusing system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62

- (10): 104202.
- 常强, 杨艳芳, 何英, 等. 4π 聚焦系统中振幅和相位调制的径向偏振涡旋光束聚焦特性的研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(10): 104202.
- [23] Cui W J, Song F, Song F F, *et al.* Trapping metallic particles under resonant wavelength with 4π tight focusing of radially polarized beam [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20062.
- [24] Wang X Y, Rui G H, Gong L P, *et al.* Manipulation of resonant metallic nanoparticle using 4π focusing system [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24143-24152.
- [25] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proceedings of the Royal Society A: 1959, 253(1274): 358-379.
- [26] Zhang Y J, Ding B F. Magnetic field distribution of a highly focused radially-polarized light beam [J]. Optics Express, 2009, 17(24): 22235-22239.
- [27] Chen G Y, Song F, Wang H T. Sharper focal spot generated by 4π tight focusing of higher-order Laguerre-Gaussian radially polarized beam [J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3937-3940.
- [28] Zhan Q. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization [J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [29] Zhang Y J, Suyama T, Ding B F. Longer axial trap distance and larger radial trap stiffness using a double-ring radially polarized beam [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1281-1283.