

非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的光操纵特性

赵明雪, 朱刘昊, 邵彤彤, 魏文军, 林奕扬, 汪奥星, 卢文栓, 李诗雨, 李新忠

引用本文:

赵明雪, 朱刘昊, 邵彤彤, 等. 非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的光操纵特性[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 841–847.

ZHAO Ming-xue, ZHU Liu-hao, SHAO Tong-tong, et al. Optical manipulation characteristics of yeast cells by asymmetric dynamic vortex beams[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 841–847.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

艾里光束调控与三维显微成像应用

Airy beam modulation and its application in 3 D microscopic imaging

液晶与显示. 2021, 36(6): 848–853 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0030>

基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展

Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators

液晶与显示. 2021, 36(6): 797–809 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0049>

用于智能显示的相位型计算全息图的设计

Design of phase type computer-generated-hologram for intelligent display

液晶与显示. 2018, 33(3): 245–253 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183303.0245>

空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究

Algorithm research of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection

液晶与显示. 2020, 35(6): 537–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0537>

基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究

Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator

液晶与显示. 2018, 33(9): 764–771 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0764>

文章编号:1007-2780(2021)06-0841-07

非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的光操纵特性

赵明雪¹, 朱刘昊¹, 邵彤彤¹, 魏文军¹, 林奕扬¹, 汪奥星¹,

卢文栓¹, 李诗雨¹, 李新忠^{1,2*}

(1. 河南科技大学 物理工程学院, 河南 洛阳 471023;

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:提出一种基于非对称涡旋光束的动态光镊, 实验中基于计算全息技术, 通过对涡旋光束的动态调控, 实现了酵母菌细胞的分离与聚合, 探究了非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的操纵特性。计算了用此光镊系统操纵酵母菌细胞时的光阱刚度, 在激光器出射功率为 230 mW 时, 光阱刚度统计均值为 0.098 5 pN/ μm 。

关键词:光镊; 非对称涡旋光束; 计算全息; 空间光调制; 光阱刚度

中图分类号:O43 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0023

Optical manipulation characteristics of yeast cells by asymmetric dynamic vortex beams

ZHAO Ming-xue¹, ZHU Liu-hao¹, SHAO Tong-tong¹, WEI Wen-jun¹,

LIN Yi-yang¹, WANG Ao-xing¹, LU Wen-shuang¹, LI Shi-yu¹, LI Xin-zhong^{1,2*}

(1. School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology,

Luoyang 471023, China;

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

Abstract: The dynamic optical tweezers based on asymmetric vortex beam is proposed. The separation and polymerization of yeast cells are realized by dynamic regulation of vortex beam based on computational holography, the manipulation characteristics of asymmetric dynamic vortex beam on yeast cells is investigated. Finally, the optical trap stiffness of this optical tweezers system to manipulate yeast cells is calculated. The statistical average value of the optical trap stiffness is 0.098 5 pN/ μm when the laser output energy is 230 mW.

收稿日期:2021-01-23; **修订日期:**2021-02-18.

基金项目:国家自然科学基金项目 (No. 11974102; No. 11704098, No. 11974101); 瞬态光学与光子学国家重点实验室 (No. SKLST201901); 河南省教育厅高等学校重点科研项目 (No. 21zx002); 国家级大学生创新创业训练计划 (No. 202010464054)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11974102, No. 11704098, No. 11974101); State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics (No. SKLST201901); Key Scientific Research Projects of Institutions of Higher Learning of Henan Province Education Department (No. 21zx002); National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.202010464054)

* 通信联系人, E-mail: xzli@haust.edu.cn

Key words: optical tweezers; asymmetric vortex beam; computational holography; spatial light modulation; optical trap stiffness

1 引言

光镊是由高度聚焦的激光形成的特殊工具^[1],相比于人们常用的机械镊子,它可以在捕获、操纵微小粒子时,通过定性操纵微小粒子来测量小到皮牛顿量级的力,最主要的是操纵微粒的过程中并不需要通过直接接触的方式,对微粒也不会造成机械伤害,这使得其成为近年来一大研究热点。目前光镊已广泛应用于生命科学^[2-3]、生物学^[4]、化学物理^[5-7]、纳米技术^[8-11]等研究领域。

在生物医学领域,光镊技术的应用范围非常广泛。比如在光镊操作中,微粒的间距和相互作用力会有相应的变化,通过相关的测量就能够得到其动力学信息^[12],所以光镊可用于静态力学性质研究和生物大分子生命过程中的动力学行为研究等方面^[13-16]。近年来,人们研究了许多操纵微粒的方式^[17],许多都用到了光镊。在生物学领域,比如在通过核小体的拉伸探究 DNA 与组蛋白之间相互作用机制的实验中使用了单光镊-微针联用^[18]的方法,在测量拉断荧光标记的微观所需力的大小^[19]的实验中采用了双光镊的方法等。在物理学领域,如在双光镊测量胶体微粒间相互作用势的实验中^[20],首先需要用双光镊分别捕获一个聚苯乙烯小球,并调整合适的间距,再通过外加斩光器同时挡住两束激光来达到同时释放的效果。但上述技术仍存在一些问題,例如对于体积较小的细胞或微球、微管的吸取操作比较困难^[21],而双光镊系统需要用到两个激光源,且其系统的搭建需要调试两条光路,较为繁琐。所以使用单光镊在实际应用中存在诸多优势。

本文提出一种利用非对称动态涡旋光束来进行操纵的新方法。结合完美涡旋模式自由变换技术^[22]与计算全息技术来实时改变涡旋的离心率,使用拓扑荷值 l 为 1 的非对称动态涡旋光束将粒子捕获在椭圆涡旋光束的两个长轴顶端,从而实现单个非对称光束对粒子的分散和聚集作用。而且在利用它进行操纵或牵拉时,可以仅通过设置掩模板的参数来调整小球之间的牵拉范围与拉伸速度,还可以立即停止动态的操纵并转换为静态

操纵,或是同时关停同时开启,轻易实现对两小球的同时释放与捕获,操作较为自由。之后为了突出其在生物学等领域的应用,利用其对酵母菌细胞的光操纵进行了力场分析,测定了光阱刚度,为使用此系统进行动态操纵粒子提供了实验的支撑与数据的参考。

2 理论

由于主要目标是实现粒子的分散与聚集,本文主要研究对象为 l 为 1 的涡旋光束。但传统涡旋光束的中心亮环半径是由拓扑荷值决定的,当拓扑荷值恒等于 1 时,涡旋光束的半径在聚焦面仅与透镜和掩模板相关。所以本文采用完美涡旋以此控制涡旋半径。同时利用模式变换技术产生非对称效果以实现粒子的分散与聚集。该技术通过转换式

$$\begin{cases} mx = r \cos(\theta) \\ y = r \sin(\theta) \end{cases}, \quad (1)$$

将坐标系 (x, y) 转化为椭圆极坐标系 (r, θ) 。由此,该光束在 $l=1$ 的情况下,其复振幅表达式可以写为

$$E(r, \theta) = \frac{\omega_g}{\omega_m} \exp(i\theta) \exp\left(-\frac{(r-R)^2}{\omega_m^2}\right), \quad \omega_m = m\omega_0, \quad (2)$$

其中: ω_g 高斯光束的束腰半径, ω_m 是光束在傅里叶平面上的束腰半径, R 是一个常数,用来确定非对称完美涡旋光束的长短轴。 $\omega_0 = 2f/k\omega_g$ 是高斯光束聚焦后的束腰。通过改变拉伸系数 m 的大小,完美涡旋光束从圆转换为椭圆。当 $0 < m < 1$ 时,圆沿竖直方向被拉伸为一个椭圆,离心率 $e = \sqrt{1-m^2}$ ($\sqrt{}$ 为平方根函数)随着拉伸系数 m 的减小而增大;相反地,当 $m > 1$ 时,圆沿水平方向被拉伸为一个椭圆,离心率 $e = (1-m^2)$ 随着拉伸系数 m 的增大而增大。若两个涡旋的拉伸系数 m_1, m_2 满足 $0 < m_1 < 1, m_2 > 1$, 且 $m_1 \cdot m_2 = 0$, 则它们的椭圆离心率是一样的,只是椭圆的拉伸方向互相垂直。之后对光束的梯度力进行计算。由于该实验粒子为酵母菌,粒子大

小在 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 之间,故采用以下方法计算梯度力^[23]:

$$F_{\text{grad}}(r, \theta) = C \nabla |E(r, \theta)|^2, \quad (3)$$

C 是一个与粒子大小、折射率有关的常数。公式(3)反映了光场梯度力与光场能量梯度成正比。计算出的归一化结果分别如图 1(a1)~(a3)的黑色箭头所示,箭头的方向代表梯度力的方向,箭头的长短代表梯度力的大小。图 1(b1)~(b3)是第一行图中虚线框内的放大图。可以很明显地看到,光束梯度力的方向随着拉伸系数 m 的增大逐渐指向端点处。为了更好地对比 m 对梯度力的影响,如图 1(b1)~(b3)所示,选择实心圆区域,提取其梯度力绘制图 1(c),由图可清晰地观察到梯度力随着 m 的增大在 $0 \sim 7$ 时变大,当 $m > 7$ 之后的缓慢降低是由于光强高度集中在端点处,光强越来越平缓导致的。

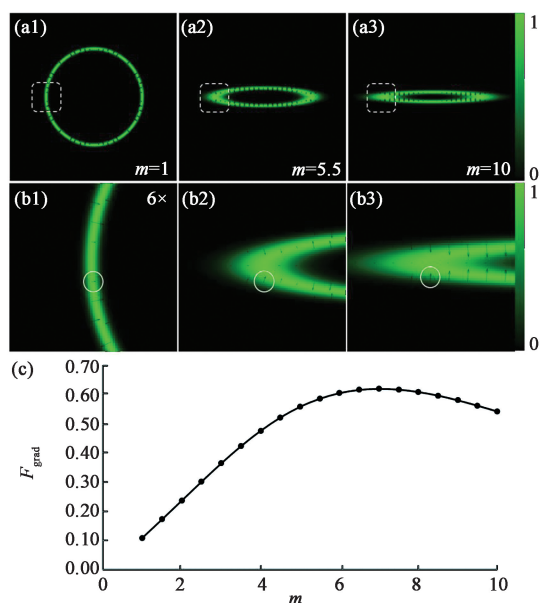


图1 拉伸系数 m 不同的光强及梯度力。(a1)~(a3) $m = 1, 5.5, 10$ 时的光强及梯度力;(b1)~(b3)分别为图(a1)~(a3)中虚线标注区域的放大图;(c)为(b1)~(b3)中实心圆区域在 $m = 1 \sim 10$ 时梯度力大小变化曲线。

Fig.1 Optical intensity and gradient force with different tensile coefficient m . (a1)~(a3) Intensity and gradient force of $m = 1, 5.5, 10$; (b1)~(b3) Enlarge view of the dotted line in (a1)~(a3); (c) Gradient force curve in the region of solid circle in (b1)~(b3) with $m = 1 \sim 10$.

3 实验装置

为了验证以上的理论,并突出其在生物学等其他领域中的应用,搭建了如图 2 所示的光镊实验装置,激光束($0 \sim 2 \text{ W}$ 可调激光器,波长为 532 nm)被针孔滤波器和凸透镜 1($f_1 = 20 \text{ cm}$)扩束整形后得到平面光,经过偏振片 P1 后,将光束调整为偏振方向相同的线偏振光,照射到输入有掩模板的空间光调制器 (SLM, HOLOEYE PLUTO-VIS-016, 像素尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, 响应时间 66 ms , 刷新率 60 Hz),衍射后的 $+1$ 级即是所需光束。在经过 $4f$ 系统滤波后,使用凸透镜 2 和 3($f_2 = 25 \text{ cm}$, $f_3 = 15 \text{ cm}$)所组合成的中继透镜将光束耦合到倒置显微物镜($100\times$, oil)后形成紧聚焦的光斑,在样品池中对酵母细胞进行光操纵。照明光源(波长为 $620 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$)发出的光经过凸透镜 5($f_5 = 20 \text{ cm}$)和聚焦物镜($25\times$)照射在样品台上,所成的像通过二向色镜和凸透镜 4($f_4 = 20 \text{ cm}$)进入 CCD 相机中(Basler acA1600-60gc 型彩色相机,分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$)。可以在与 CCD 相连的计算机上实时观察到非对称完美涡旋对微粒的动态捕获过程。

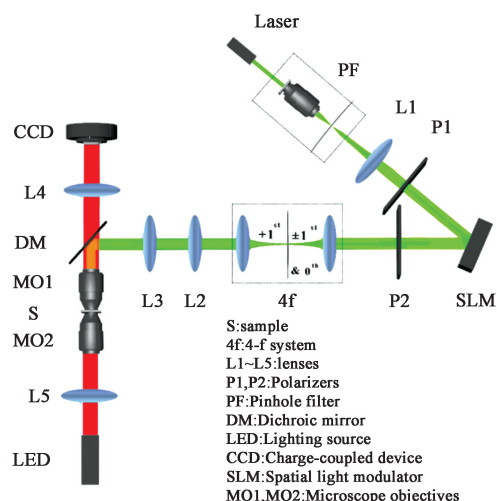


图2 实验装置图

Fig.2 Schematic of the experimental setup

相位掩模板的生成利用的是锥透镜法^[24],是通过干涉记录得到的,其表达式可写为

$$t(r, \theta) = \text{circ}(r) \exp \left[ik(n-1)\alpha r + i\theta + \frac{i2\pi r \cos\theta}{mD} \right], \quad (4)$$

其中 $\text{circ}()$ 为圆域函数, α 为锥透镜的锥角, n 为锥透镜的折射率, D 为闪耀光栅的周期, 其具体生成过程如图 3 第一行所示。图 3(a1) 为涡旋光束的螺旋相位, 与在椭圆坐标中生成的锥透镜相位(图 3(a2))相加用以生成近似椭圆贝塞尔-高斯光束。随后, 再与闪耀光栅(图 3(a3))相加, 其作用是将衍射级与 0 级在空间分离。后用椭圆光阑(图 3(a4))与掩模板相乘用以将入射光裁剪为椭圆形。图 3(a5) 即为所生成的相位掩模板。图 3(b1)~(b5) 为所生成的几个不同拉伸系数的掩模板。利用计算机将生成大量的相位掩模板连续写入 SLM 中, 然后采用平面光(参考光束)照射 SLM, 之后经过傅里叶透镜变换后, 在透镜焦平面上衍射再现产生了动态变换的椭圆完美涡旋光束。

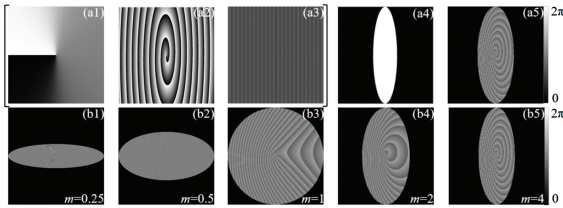


图 3 相位掩模板的生成过程。(a1) 涡旋光束的螺旋相位图;(a2) 椭圆坐标下锥透镜螺旋相位图;(a3) 闪耀光栅;(a4) 椭圆孔径;(a5) 相位掩模板;(b1)~(b5) 不同拉伸系数的掩模板。

Fig.3 Generation of the phase mask. (a1) Spiral phase pattern of vortex beam; (a2) Spiral phase pattern of the axicon in elliptic coordinates; (a3) Blazed grating; (a4) Elliptical aperture; (a5) Phase mask pattern; (b1)~(b5) Phase mask pattern with the different scaling factor.

4 结果与分析

下文以拓扑荷值 $l=1$, 拉伸系数 $m=1.5\sim 4$ 的动态涡旋光束为例, 基于上述实验装置, 在激光器出射功率为 230 mW 的条件下, 探究了非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的操纵特性。为了实现动态的变化, 在拉伸系数 $1.5\sim 4$ 中以间隔为 0.01 取值, 由此生成了 250 的掩模板图后, 输入

空间光调制器, 空间调制器以 10 Hz 的频率播放掩模板图, 在观察面上便得到了动态变化的涡旋光束。如图 4 所示, 具有黑色光晕的红色亮斑为酵母菌细胞, 由于使用了二向色镜, 导致绿光在 CCD 中无法观测, 因此采用了绿色的虚线标注光束位置, 拉伸系数 m 在 $1.5\sim 4$ 间变化。图中可以看出, 初始时刻两个酵母菌细胞距离较近, 随着光束的横向离心率逐渐增大, 两个酵母菌细胞逐渐相互远离并被束缚在光束的两个长轴顶端, 呈现相互分离的现象, 如图 4(a)~(f) 所示。6 s 后, 随着拉伸系数的减小, 酵母菌细胞的间距也逐渐减小, 如图 4(g)~4(l) 所示。此现象符合上述对梯度力的分析。

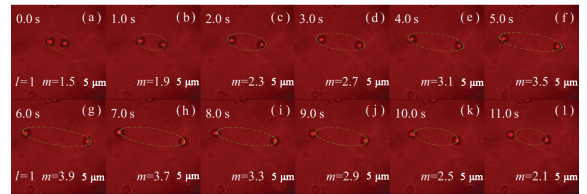


图 4 拓扑荷值为 1, 拉伸系数 m 为 $1.5\sim 4$ 的非对称动态涡旋光束对酵母菌细胞的操纵。

Fig.4 Manipulation of yeast cells by asymmetric dynamic vortex beams with a topological charge value of 1, and a stretching factor m of $1.5\sim 4$.

当用于其他领域时, 有时不仅需要利用光镊对微小粒子进行操控, 还需要对光镊操控微小粒子的操控力进行精确数量级的大小研究, 来得到进一步的分析, 而要想测量这一微小力, 基础就是对刚度的标定^[25-26]。作用于所捕获微粒上的光力 F 与微粒偏离光阱中心的位移 x 有着正比的关系: $F = -kx$, 采用的测量方法为拖拽力法, 即假设液体的流体速度等于样品台位移速度, 此速度需保证恒定不变, 则因流体粘性施加到粒子上的力^[27-28]为

$$F_{\text{drag}} = 6\pi\eta r v, \quad (5)$$

式中, F_{drag} 为拖拽力, η 为液体动态粘度, r 为颗粒半径, v 为流体速度。

通过非对称动态涡旋光束对一个酵母菌细胞的操纵进行了刚度的标定。为了实现动态的变化, 在拉伸系数 $m=1\sim 4$ 中以间隔为 0.01 取值, 由此生成了 300 张的掩模板图后, 输入空间光调制器, 空间光调制器最高能以 60 Hz 的频率播放掩模板, 在观察面上便得到了动态变化的涡旋光束。设拉

伸系数从1变化到4再从4变化回1为一个周期,通过测量2个周期内酵母菌细胞的偏移量,即酵母菌细胞两次横向的位置变化来进行数据分析,记录细胞每隔0.5 s的位置变化,如图5所示,记所得各段速度为 v_i ($i=1,2,3,\dots,39,40$),由 $\bar{v}=\sum v_i/40$,可得酵母菌细胞运动平均速度 $\bar{v}=3.789\ \mu\text{m/s}$ 。已知蒸馏水在室温($T=298\ \text{K}$)下的动态粘度 $\eta=8.937\times 10^{-4}\ \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,由测量计算得酵母菌细胞半径 $r=2.770\ \mu\text{m}$,以细胞运动的平均速度为流体速度,由式(5)可得拖拽力 $F_{\text{drag}}=0.177\ \text{pN}$ 。

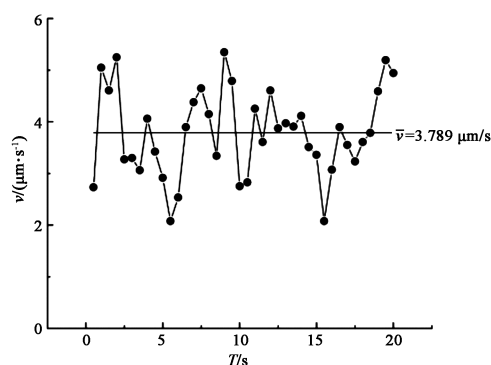


图5 非对称完美涡旋操纵酵母菌横向拉伸速度图

Fig.5 Asymmetric perfect optical vortex manipulation yeast lateral stretching speed diagram

在运动过程中,由于光阱力与拖拽力平衡,即

$$F_{\text{drag}} = kx, \quad (6)$$

再由光阱力(拖拽力)除以相应位移可计算出光阱刚度统计均值为 $0.0985\ \text{pN}/\mu\text{m}$ 。此值为激光能量 $230\ \text{mW}$ 时的结果,而光阱刚度与微粒处激光能量成正比^[29],继续增大激光能量可以得到更强的光阱刚度,以满足其他领域的不同需求。

5 结 论

本文通过对非对称完美涡旋光束的梯度力进行模拟,发现非对称完美涡旋光束在拓扑荷值 l 为1的情况下,梯度力可以确保酵母菌细胞被稳定捕获到椭圆涡旋光束的两个长轴顶端。理论上这可以应用于光镊中,实现粒子的分离和聚合。为了验证其切实可行,搭建了光镊实验系统,结合完美涡旋模式自由变换技术与计算全息技术来实时改变涡旋的形状,在实验中实现了酵母菌细胞的分离与聚合。最后,通过计算完成了对非对称动态涡旋光束操纵酵母菌细胞的光阱刚度标定。在激光出射功率为 $230\ \text{mW}$ 时,光阱刚度统计均值为 $0.0985\ \text{pN}/\mu\text{m}$ 。这对依靠此系统操纵相似大小的生物细胞及微粒的操纵力大小的研究有着指导意义,并证明了非对称动态涡旋光束的光操纵在生物光子学等领域中有着光明的应用前景。

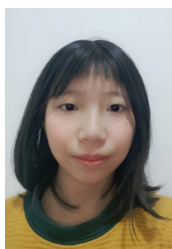
参 考 文 献:

- [1] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [2] LENTON I C D, SCOTT E K, RUBINSZTEIN-DUNLOP H, *et al.* Optical tweezers exploring neuroscience [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 602797.
- [3] BERNIS M W. Laser scissors and tweezers to study chromosomes: a review [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 721.
- [4] 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.
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. (in Chinese)
- [5] CHEN A, LI S W, XU J H. A novel approach to study the interactions between polymeric stabilized micron-sized oil droplets by optical tweezers [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(5): 1368-1374.
- [6] GORKOWSKI K, DONAHUE N M, SULLIVAN R C. Aerosol optical tweezers constrain the morphology evolution of liquid-liquid phase-separated atmospheric particles [J]. *Chem.*, 2020, 6(1): 204-220.
- [7] 蔡宸,张韫宏.光镊技术在气溶胶物理化学表征中的应用[J].中国光学,2017,10(5):641-655.
CAI C, ZHANG Y H. Application of optical tweezers technology in physical chemistry characterization of aerosol [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 641-655. (in Chinese)
- [8] REIMANN R, DODERER M, HEBESTREIT E, *et al.* GHz rotation of an optically trapped nanoparticle in vacu-

- um [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033602.
- [9] AHN J, XU Z J, BANG J, *et al.* Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033603.
- [10] ZHANG Y Q, SHEN J F, MIN C J, *et al.* Nonlinearity-induced multiplexed optical trapping and manipulation with femtosecond vector beams [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5538-5543.
- [11] BASSINDALE P G, PHILLIPS D B, BARNES A C, *et al.* Measurements of the force fields within an acoustic standing wave using holographic optical tweezers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(16): 163504.
- [12] 冯楠, 高影. 单分子光镊技术在生命科学中的应用[J]. 中国细胞生物学学报, 2015, 37(10): 1345-1352.
FENG N, GAO Y. Applications in life science of single-molecule optical tweezers [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*, 2015, 37(10): 1345-1352. (in Chinese).
- [13] 常婉晴, 郭云霞, 崔玉军, 等. 单细胞光学操纵方法研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(6): 575-588.
CHANG W Q, GUO Y X, CUI Y J, *et al.* Research progress of single-cell optical manipulation techniques [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2020, 50(6): 575-588. (in Chinese)
- [14] ZHU R X, AVSIEVICH T, POPOV A, *et al.* Optical tweezers in studies of red blood cells [J]. *Cells*, 2020, 9(3): 545.
- [15] BUSTAMANTE C, ALEXANDER L, MACIUBA K, *et al.* Single-molecule studies of protein folding with optical tweezers [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2020, 89: 443-470.
- [16] 张晓晖, 郭彦, 吴建光, 等. 光镊技术在生命科学研究中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(6): 24-31.
ZHANG X H, GUO Y, WU J G, *et al.* Application of optical tweezers in biological research [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(6): 24-31. (in Chinese)
- [17] MOFFITT J R, CHEMLA Y R, SMITH S B, *et al.* Recent advances in optical tweezers [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2008, 77: 205-228.
- [18] MIHARDJA S, SPAKOWITZ A J, ZHANG Y L, *et al.* Effect of force on mononucleosomal dynamics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(43): 15871-15876.
- [19] 曹立, 李萌, 张晓松, 等. 近场荧光研究 YWK-II 蛋白/APLP2 和 MIS 的相互作用[C]//第十一届基础光学与光物理讨论会论文摘要集. 井冈山:《量子电子学报》编辑部, 2004.
CAO L, LI M, ZHANG X S, *et al.* Near-field fluorescence studies YWK-II protein/APLP2 and MIS interactions [C]//Abstracts of the 11th Symposium on Basic Optics and Photophysics. Jinggang Mountains: Editorial Department of Journal of Quantum Electronics, 2004. (in Chinese)
- [20] 任洪亮, 庄礼辉, 李银妹. 双光镊测量胶体微粒间相互作用势[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 151-155.
REN H L, ZHUANG L H, LI Y M. Measurement of interaction potential between colloidal particles using dual optical tweezers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(1): 151-155. (in Chinese)
- [21] 丰蕾, 杨帆, 李彩霞, 等. 单细胞分离检验技术在法医学中的应用研究[J]. 刑事技术, 2015, 40(5): 359-363.
FENG L, YANG F, LI C X, *et al.* Single cell separation testing and its forensic application [J]. *Forensic Science and Technology*, 2015, 40(5): 359-363. (in Chinese)
- [22] 李新忠, 孟莹, 李贺贺, 等. 完美涡旋光束的产生及其空间自由调控技术[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026018.
LI X Z, MENG Y, LI H H, *et al.* Generation of perfect vortex beams and space free-control technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026018. (in Chinese)
- [23] 李静, 朱春丽, 伍小平. 全息光镊[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LI J, ZHU C L, WU X P. *Holographic Optical Tweezers* [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [24] LI X Z, MA H X, YIN C L, *et al.* Controllable mode transformation in perfect optical vortices [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 651-662.
- [25] 龚璠, 陈洪涛, 李银妹, 等. 四种光阱刚度测量法的实验研究与比较[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(5): 601-607.
GONG Z, CHEN H T, LI Y M, *et al.* The experimental research and comparison of four methods to measure the optical trap stiffness [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2005, 35(5): 601-607. (in Chinese)

- [26] 朱春丽,李静.采用玻尔兹曼统计法分析光阱刚度的测量精度[J].光学精密工程,2016,24(8):1834-1839.
ZHU C L, LI J. Analysis of stiffness measurement precision of optical trap with Boltzmann statistics method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1834-1839. (in Chinese)
- [27] FLORIN E L, PRALLE A, STELZER E H K, *et al.* Photonic force microscope calibration by thermal noise analysis [J]. *Applied Physics A*, 1998, 66(1): S75-S78.
- [28] NEUMAN K C, BLOCK S M. Optical trapping [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(9): 2787-2809.
- [29] ONO M, PREECE D, DUQUETTE M L, *et al.* Mitotic tethers connect sister chromosomes and transmit “cross-polar” force during anaphase A of mitosis in PtK2 cells [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(10): 4310-4315.

作者简介:



赵明雪(2000—),女,河南鹤壁人,硕士研究生,2020年于河南科技大学获得学士学位,主要从事光场调控技术方面的研究。E-mail: 1142791596@qq.com



李新忠(1979—),男,博士,教授,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光场调控技术方面的研究。E-mail: xzli@haust.edu.cn