

文章编号: 0258-7025(2003)03-0211-05

空心新型光阱的实验研究

尹良红, 李银妹, 楼立人, 张 达, 陈洪涛

(中国科学技术大学选键化学开放实验室/物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 介绍了用锥镜法和取高级衍射光斑法来实现空心光阱的实验方法。用实验定性地证明了空心光阱轴向捕获力高于实心光阱。用图像分析法比较了空心光阱与实心光阱近中心横向光阱刚度(光焦点附近小范围内的光阱横向刚性程度), 表明同等条件下空心光阱的近中心横向光阱刚度弱于实心光阱。用流体力学法测量光阱的逃逸阱力随光功率的变化, 表明同等条件下空心光阱的逃逸阱力大于实心光阱, 因此空心光阱操纵微粒具有更高的稳定性。同时指出了空心光阱具有更低的热损伤, 在低倍物镜下空心光阱具有更高的实用价值, 以及空心光阱适于更加高精度的实验操作。

关键词 激光物理; 空心光阱; 角锥透镜; 高级衍射光斑法; 轴向捕获; 横向捕获; 逃逸阱力

中图分类号 O 435 **文献标识码** A

Experimental Research of Doughnut, a New Kind of Laser Trap

YIN Liang-hong, LI Yin-mei, LOU Li-ren, ZHANG Da, CHEN Hong-tao

(Lab of Bond-selective Chemistry/Physics Department, USTC, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract The experimental method used to form doughnut laser trap through axicons and by extracting high-order diffractive light component is introduced. It is demonstrated qualitatively that doughnut laser trap has higher axial trapping force than Solid laser trap. The central horizontal trap stiffness of doughnut laser trap and solid laser trap is measured by the method of image analyzing. The result demonstrates that solid laser trap is more rigid. The escaping force of laser trap, varying corresponding to different laser power, is measured by fluid mechanical method. The result demonstrates that doughnut laser trap has higher escaping force, thus can manipulate particles with more stability. It is indicated that doughnut laser trap brings to lower thermal damnification, and helps to make best use of low magnification objective lens, and helps to develop double laser traps.

Key words laser physics; doughnut laser trap; axicons; high-order diffractive; axial trapping; horizontal trapping; escaping force

1 引 言

单光束梯度力光阱(或光镊)自从 A. Ashkin 提出以来^[1], 已成功地应用于生命科学等领域的研究, 成为操作微米量级粒子最强有力的工具。但已有的光阱大都是 100×物镜下强会聚的实心光阱, 在使用中逐渐暴露出一些缺陷: 即长时间的激光辐照会造成对活性生物体的损伤。为此人们一直在努力提高光阱的捕获效果, 即在相同的输入激光能量

及相同耦合条件下得到更高的有效捕获力, 从而能减小热损伤效应。因捕获阱力与光阱光场的分布特性密切相关, 人们研究利用波面转换来改变光场能量分布, 如形成空心光场实现空心光阱来达到此要求。已有模拟计算表明, 在相同的光功率下空心光阱比实心光阱具有更高的有效捕获力^[1,2]。空心光阱是由准平行空心光束经物镜耦合后形成的光阱, 光束中心能量分布几乎为零, 光阱散射力弱而梯度力几乎不受影响, 整体捕获效果得到增强。因此为

收稿日期: 2001-11-22; 收到修改稿日期: 2002-01-11

基金项目: 国家基金委(10072062, 19890380)资助项目。

作者简介: 尹良红(1978—), 女, 中国科学技术大学物理系硕士研究生, 主要研究方向为光阱设备和应用等。E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn

达到相同的捕获效果,空心光阱只需较低的输入光功率,可减小热损伤,更适用于对生物活体细胞的研究。所以实现空心光阱,以及对其性能的研究具有重大理论意义和实用价值。

已有对于空心光阱研究的报道,采用的方法主要是直接用激光器输出 TEM_{01} 模环形光场^[3]及用全息图法产生空心光束^[4]等。但这些方法都缺乏实用性。另外,M. Rioux,蔡邦维等对角锥透镜进行了研究^[5,6],他们用单片凸锥透镜得到了环形光,并指出了使用凹凸锥镜组形成平行空心光束的可能性。用单片凸锥镜形成的环形光场来实现激光冷却和捕获原子的实验^[7]也有报道。但是操作微米粒子的光阱要求光源为高质量的准平行光,经物镜后可形成高度会聚的光场。单片凸锥镜无法达到此要求。

本文报道使用锥镜组法及取高级衍射光斑法实现空心光阱,以及对空心光阱捕获特性的实验研究结果。

2 空心光阱的实现

2.1 角锥透镜组法

M. Rioux 等在文献^[5]中对角锥透镜的成像特性作了描述。将棱角相同的正负角锥透镜组合可构成一种空心光束扩束器。图 1 为角锥透镜工作原理。图中 h 为入射光半径, φ 为锥镜棱角, $\delta = 2\sin^{-1}[n \times \sin(\varphi/2)] - \varphi$ 为偏向角, d 为锥镜间距, r_1 为输出空心光外环半径, $r_2 = \frac{d \tan \varphi \tan \delta}{1 - \tan \varphi \tan \delta}$ 为内环半径,环宽 $r_1 - r_2 = h$ 恒定不变。

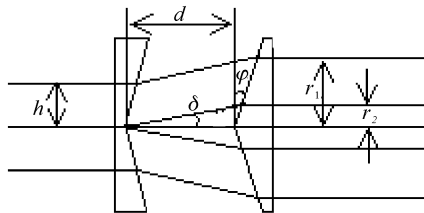


图 1 角锥透镜扩束器

Fig. 1 Axicon beam expander

图 2 为实验用角锥透镜,棱角 $\varphi = 0.175$ rad,直径 300 mm。

图 3 为实验装置图。经透镜组扩束的平行光通过锥镜组后形成空心的平行光。光束耦合入显微镜形成空心光阱。光路调节使光束达到最佳耦合条

件,对本实验系统而言光束会聚点在显微镜外,距耦合窗口(图 3 中 M_3) 约 20 cm 处,物镜后瞳处光束直径约 6 mm(光束充满物镜后瞳)。两台计算机分别用来采集图像和控制 PZT 自动平台。实验用激光器为 SDL-5411-G1 810 nm 半导体激光器,显微镜为 OLYMPUS IX70。

40×物镜下实验所得光束焦点处(样品池底上表面)光斑直径约为 $5 \mu\text{m}$,图 4 为 40×物镜下空心光阱的离焦像。

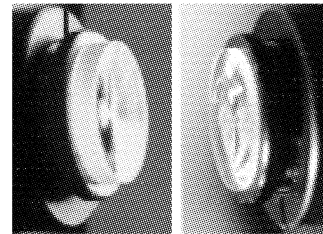


图 2 角锥透镜组

Fig. 2 Axicons

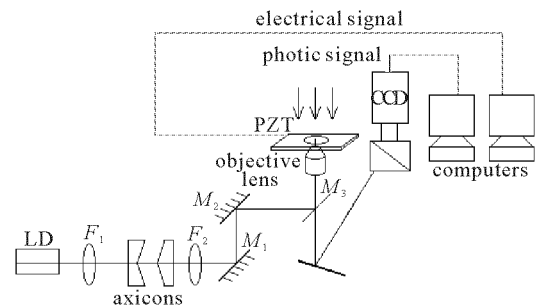


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup

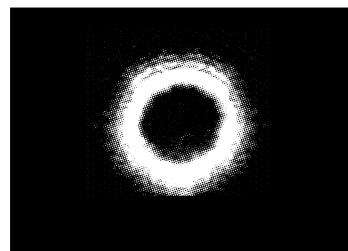


图 4 40×物镜所得光阱离焦像

Fig. 4 Experimental result obtained by using a 40× objective

理想状态下锥镜法有很多优点,尤其是它能量损失小。但因锥镜加工困难,凹锥镜中心直径约 2 mm 范围内因有畸形而不可用,造成较大能量损失,且锥镜调节复杂,光学元件多,光束质量变差。

2.2 取高级衍射光斑法

实验中关键的光学元件是环形光阑,它能除去激光的零级衍射光斑,取高级衍射光斑,形成环形光,且可调节环宽。环形光阑的制作较易,用计算机绘图,再做成透明片即可。用这种方法获得了空心光束。图 5 为环形光阑,光阑内部黑斑用来遮去光束中心光场形成衍射环,外部黑环用来修正半导体激光的条形光斑。

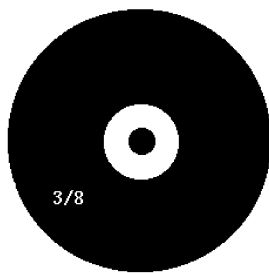


图 5 环形光阑

Fig. 5 Light diaphragm

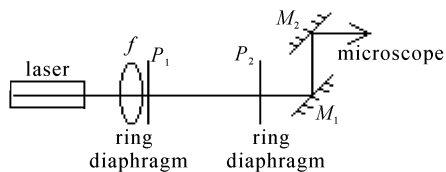


图 6 实验光路示意

Fig. 6 Optical arrangement

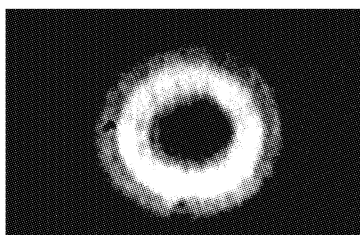


图 7 40×物镜所得光阱离焦像

Fig. 7 Experimental result obtained by using a

40× objective

实验装置光路部分如图 6 所示。光源输出的光束经透镜后为微会聚光束,通过第一枚环形光阑产生衍射环,第二枚环形光阑除去零级衍射光斑,取高级衍射光斑,形成较理想的空心光束。取高级衍射光斑法产生空心光易于操作,光束质量好,40×物镜下实验所得光束焦点处光斑直径约为 $5 \mu\text{m}$ 。

图 7 为 40×物镜下空心光阱的离焦像。光路中取下环形光阑就可得到相同耦合条件下的实心光阱。后续工作是用这种方法进行的,但它的缺点是

能量损失大,能量利用率仅 18%。

3 空心光阱与实心光阱捕获实验结果

3.1 轴向捕获

已有的光阱大都是与 $100\times$ 物镜相耦合的,但 $100\times$ 物镜工作距离短且要用油镜,给有些工作带来不便。 $40\times$ 物镜的会聚度较低,形成的实心光阱散射力大,难以实现有效的捕获。而空心光阱散射力小,可以很容易地实现对酵母菌的轴向捕获。图 8 为酵母菌在 $40\times$ 物镜下空心光阱中轴向被缓慢提升的过程。

实验表明, $40\times$ 物镜下的空心光阱,轴向捕获效果优于实心光阱。因此空心光阱比实心光阱更适合于与低倍物镜耦合,有利于发挥低倍物镜长工作距离的优点,这一点尤其适用于正置式显微镜和一些不必使用 $100\times$ 油镜的场合。同时还观察到:在相同的入射光功率下空心光阱的阱域小于实心光阱。

3.2 横向捕获

使用图像分析法测量两种光阱的近中心横向光阱刚度,及用流体力学法测量两种光阱的横向逃逸阱力可提供两种光阱中微粒横向运动特性的实验依据。为消除实验样品带来的影响,实验中微粒固定为 $3 \mu\text{m}$ 直径聚苯乙烯小球。实验在保持相同耦合条件及相同物镜出射光功率的条件下分别测量了 $100\times$ 物镜下两种光阱的近中心横向光阱刚度及逃逸阱力。 $100\times$ 物镜下光焦斑约 $1 \mu\text{m}$ 。

3.2.1 图像分析法测量光阱横向刚性系数

通过对微粒在光阱中作热运动的微小位移的测量,可以得到微粒在光阱中所受的回弹力^[8,9]。微粒在光阱束腰附近的势能类似于弹簧的弹性势能 $U(x,y) = K_x x^2/2 + K_y y^2/2$, x, y 为小球偏离平衡位置的位移大小, K_x, K_y 分别为光阱在 x 轴, y 轴方向上的刚性系数。由统计物理理论可计算得 $\langle x^2 \rangle = K_B T / K_x$, 其中 K_B 是 Boltzmann 常数。分析大量图像得到各瞬间小球的微粒位移 x , 计算得 $\langle x^2 \rangle$, 可得光阱的刚性系数 $K_x = K_B T / \langle x^2 \rangle$ 。 K_y 可经类似的方法计算得到。本实验测量 x 的误差大约为 14 nm 。图 9 为两种光阱的刚性系数 K_x 随光功率变化的实验数据图, 其中曲线为经实验数据拟合得到的, 曲线 1 为实心光阱, 曲线 2 为空心光阱。

由图 9 可以看出在同等条件下, 空心光阱的横向刚性系数弱于实心光阱的横向刚性系数, 定性地与模拟计算^[2]相一致。两种光阱的刚性系数均体现

出与光功率近似成平方关系的特点,对这一点的深入的理论分析有待于下一步的工作。

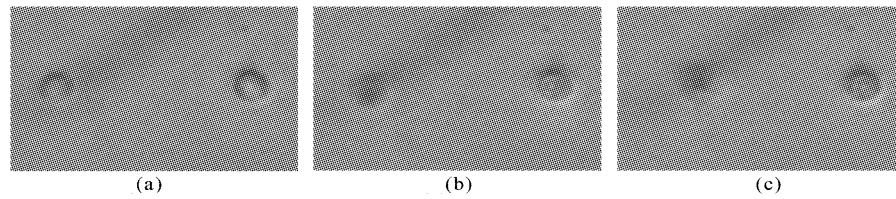


图 8 40×物镜下空心光阱轴向捕获酵母菌

Fig. 8 Trapping microzymes axially by a 40× objective Doughnut laser trap

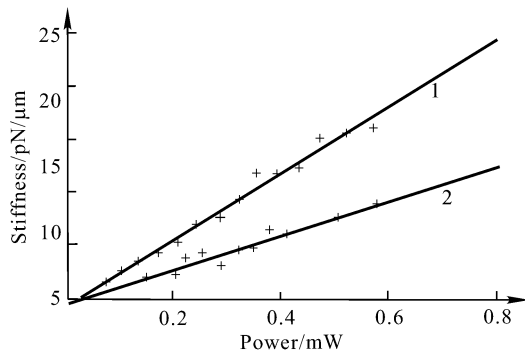


图 9 刚性系数与光功率关系曲线

Fig. 9 Relation between stiffness and laser power

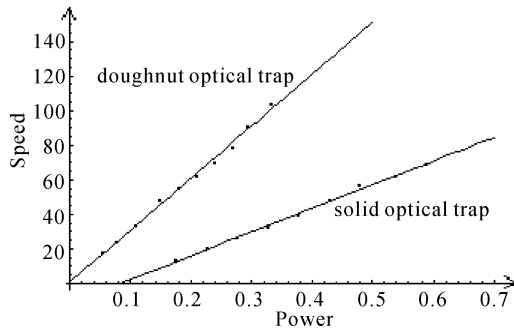


图 10 流体力学测量结果

Fig. 10 Trapping force obtained by the method of hydrodynamics

3.2.2 流体力学法测量横向逃逸阱力

传统的流体力学方法测量光阱阱力是使微粒被光阱束缚在空间一点上,而周围的液体环境在平台的带动下运动,根据逃逸速度(指光阱捕获微粒时平台运动可以达到的临界速度,当平台运动速度再加大时微粒从光阱中逃逸出去)可计算出微粒相对环境运动时与阱力相平衡的粘滞阻力。系统中自动平台是显微镜平台上另加载的一个压电扫描平台(以色列 NIS70),提供了平台的纳米量级精度的移动控制。图 10 给出经线性拟合的实验结果。

对于实验结果的处理,传统做法是将速度代入 Stokes 公式 $F = 6\pi\eta vR$ 求出相应阱力,其中 η 为液体的粘滞系数, R 为小球半径, v 为微粒的逃逸速度。我们直接给出逃逸速度与光功率的关系数据,这是因为实验中环境温度变化小于 1°C ,粘滞系数可近似看成一常数,逃逸速度本身就可表示出光阱中微粒的逃逸阱力的相对大小。由测量结果可知空心光阱逃逸阱力比实心光阱强得多。两种光阱都反映出逃逸阱力随光功率成线性变化的特性。

4 讨 论

由图像分析法实验结果可知:同等条件下,实心光阱的近中心横向光阱刚度强于空心光阱,即在光阱与微粒都与样品池保持相对静止(微粒在光阱中心附近作微小振动,平均位移为零)的条件下,微粒在实心光阱中的横向振幅比在空心光阱中小。

而由流体力学法测量结果可知,空心光阱的逃逸阱力明显大于实心光阱。这里使用逃逸阱力的概念,它是指平台运动达到逃逸速度时,微粒受到光阱对其的作用力。这是一个不同于横向捕获力的概念。横向捕获力是指微粒在光阱中某一位置上受到光阱作用力的横向分量。空心光阱的逃逸阱力大于实心光阱。这是因为,根据文献[2]中理论计算得到的光焦点在微粒内部任意位置处所受合力大小与方向分布图可知:在流场的作用下,微粒中心不仅在横向上偏离光阱中心位置,而且为达到重力、散射力和梯度力的平衡,必须在轴向上也偏离光阱中心。实验中观察到微粒在逃逸时总是沿轴向飘离光阱。考虑到光阱轴向阱力与横向阱力相比较弱,因此微粒是从束缚较弱的轴向上逃逸的。当光焦点在微粒的内部边界附近时光阱阱力达到最大值。微粒处于光阱稳定捕获状态时,光阱横向捕获力与流场的粘滞阻力 $F = 6\pi\eta vR$ 相平衡。增大平台运动速度,粘滞

阻力增加,光阱梯度力近似与微粒中心偏离光焦点的位移大小成正比,为达到新的平衡,微粒在横向上位移要增大,导致轴向位移的相应增大。平台运动速度达到逃逸速度时,微粒横向位移和轴向位移都达到临界值,光焦点在微粒边缘附近。散射力是由于微粒对激光的反射和吸收造成的,在边缘处达到最大值。继续增大平台运动速度或附加的扰动都会造成梯度力不足以与散射力相抗衡,微粒从轴向逃逸。相同光功率条件下,空心光阱散射力远小于实心光阱而梯度力受的影响并不大,相应地与散射力相平衡所需的梯度力也小,微粒更靠近光焦点。这样在某一光功率的实心光阱的逃逸速度下,平台运动时微粒在空心光阱中轴向位移尚未达到临界值,因此空心光阱中微粒的逃逸速度比实心光阱大。

已有的对流体力学法测量阱力的理解是:所测得的逃逸阱力就是光阱的最大横向捕获力。现在看来对这种观点有必要进行修正,即:这种方法测得的横向阱力是轴向上逃逸时的横向阱力,小于光阱的最大横向阱力。而通常在标定光阱最大横向阱力时,实际上是把逃逸时的横向阱力当作了最大横向阱力。用这种方法标定的光阱来测量微粒间的相互作用力有偏小的可能。

5 结 论

综合两种光束在 $40\times$ 物镜下形成光阱的轴向捕获效果,及图像分析法和流体力学法测量 $100\times$ 物镜下两种光阱的横向刚性系数及横向捕获力的实验结果,以及空心光阱阱域小于实心光阱阱域的实验可以得出以下结论:

1) 空心光阱是在损失一部分横向捕获稳定性的同时增强轴向捕获的稳定性。而由于与横向捕获相比轴向捕获较弱,因此损失的部分横向稳定性并不造成任何负面的影响。

2) 为了达到相同的捕获效果,空心光阱所需要的光功率比实心光阱低,因此空心光阱造成的热损伤比实心光阱更低,更适用于生物活体的研究,可以

较长时间无损伤地捕获生物微粒,扩展了光阱在生命科学中的应用范围。

3) 空心光阱有更高的轴向捕获力,比实心光阱更适合于与低倍物镜耦合,有利于发挥低倍物镜长工作距离的优点,这一点尤其适用于正置式显微镜。

4) 正是空心光阱阱域小的特性使得它适用于更精确的定位与捕获,如进行小尺寸的细胞、细胞器的分选,因此空心光阱更适于形成双光镊,避免两光镊因距离过近而造成的互相干扰。

参 考 文 献

- 1 A. Ashkin. Force of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime [J]. *Biophys. J.*, 1992, **61**:569~582
- 2 Cui Guoqiang, Li Yinmei, Weng Mingqi *et al.*. Improvement of the effective trapping force by using ring-beam laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(1):89~92 (in Chinese)
- 3 M. Harris, C. A. Hill, P. R. Tapster *et al.*. Laser modes with helical wave fronts [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(4):3119~3122
- 4 M. Reicherter, T. Haist, E. U. Wagemann *et al.*. Optical particulate trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9):608~611
- 5 M. Rioux, R. Tremblay, P. A. Be' langer. Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(10):1532~1536
- 6 Cai Bangwei, Lü Baida, Zhang Bin *et al.*. Propagation and transformation properties of axicon optical systems for laser beams [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **A21**(1):21~25 (in Chinese)
- 7 I. Manek, Yu. B. Ovchinnikov, R. Grimm *et al.*. Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon [J]. *Opt. Comm.*, 1998, **147**:67~70
- 8 E.-L. Florin, A. Pralle, E. H. K. Stelzer *et al.*. Photonic force microscope calibration by thermal noise analysis [J]. *Appl. Phys. A*, 1998, **66**(Part 1, Suppl): S75~S78
- 9 Steven Chu, *et al.*. Quantitative measurement of force and displacement using an optical trap [J]. *Biophys. J.*, 1996, **70**:1813