

文章编号: 1001-3806(2009)02-0134-04

干涉式多光镊系统研究

齐跃峰, 王健飞, 谈爱玲

(燕山大学 信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了定量测量光阱力, 采用共面但不同轴的两束激光束产生干涉光场进而构成干涉式光镊系统的方法, 分析了两束同向传输激光束以一定角度相干涉而产生干涉条纹, 即2维多光镊的原理, 并给出了3维光镊的实验系统。采用分析作用在聚苯乙烯小球上的力的方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了光阱力分布的数据。结果表明, 干涉式光镊可以提供皮牛级横向光阱力, 能够实现光捕获, 当只考虑光束的束腰半径和光功率两个因素时, 实验数据与理论分析吻合得很好。这一结果对光镊技术在生物学、生物医学以及纳米技术等领域的的应用是有帮助的。

关键词: 激光技术; 光镊; 干涉; 光阱; 囚禁; 操纵

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Research of interferometric multiple optical tweezers

QI Yue-feng, WANG Jian-fei, TAN Ai-ling

(Department of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to measure the optical trap force, how two beams with optical off-axes in one plane generate an interference field was introduced, based on which a so-called interferometric optical tweezers was built up. Firstly how two coplanar laser beams at a certain angle interfered was analyzed, i. e., the principle of two-dimension optical tweezers, then the principle of the three-dimension optical tweezers was presented. After analyzing the force acting on the polystyrene beads, the analytical and experimental data of the optical trap force were obtained. The result showed that interferometric optical tweezers could provide cross trap force about pico-Newton level and achieve optical trapping, the experiment data accorded with the theoretic results very well when only the optical power and the full width half maximum of the beam were considered. The result is very helpful to optical tweezers' application in biology, biomedicine and nano-technology.

Key words: laser technique; optical tweezers; interferometric; optical trap; confinement; manipulation

引言

自从 SHKIN 首次证明利用单束光所产生的梯度力可以囚禁微米级粒子的原理, 20 年来, 光捕获和光操纵技术在生物学、生物医学以及纳米科技等领域得到了广泛的应用^[1]。为了能在光轴方向(光传播方向)得到稳定的捕获, 传统光镊需要相当强的聚焦激光束和高数值孔径的透镜, 但这样就会增加系统成本, 因此, 需要在不影响捕获效果的同时降低对激光功率和透镜参量的要求。Rockwell 研究中心的 AUTHUR 等人发现: 轴向稳定捕获和横向稳定捕获所需的光功率大不相同, 相对较小功率的激光束即能在横向实现稳定捕获^[2]。

1 系统结构

通过对单束光阱和干涉式光阱作用原理的分析可知, 只要光功率足够强, 简单干涉式光阱同样可以实现对粒子的横向囚禁和操纵^[3]。例如, 由氩离子激光器(514.5nm)作光源的两束激光束相干涉产生稳定的驻波场可以驱动微米级电介质粒子纵向排列形成2维条状图案, 如图1a所示, 这里, 驻波场的最大值沿横向周期分布构成横向光阱。但是, 在这个例子中, 由于轴向光阱力很弱因而无法对粒子实现轴向的有效操纵, 粒子的横向排列也是被动的。然而, 这种现象还是给出了重要启示: 可以通过透镜来聚焦激光束, 从而增强干涉产生的光阱力, 实现有效光囚禁, 如图1b所示。

在理论分析的基础上, 作者设计了一套利用汇聚激光束相干涉产生干涉条纹来形成多光镊系统的实验装置, 与传统光镊相比, 它只需要很小的光功率(典型值 25mW), 除此之外, 由于它的特殊光阱分布, 使它具有一些特殊用途, 例如捕获长条形粒子, 同时操纵多个

作者简介: 齐跃峰(1972-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为光纤传感技术。

E-mail: yfqi@ysu.edu.cn

收稿日期: 2008-02-18; 收到修改稿日期: 2008-03-31

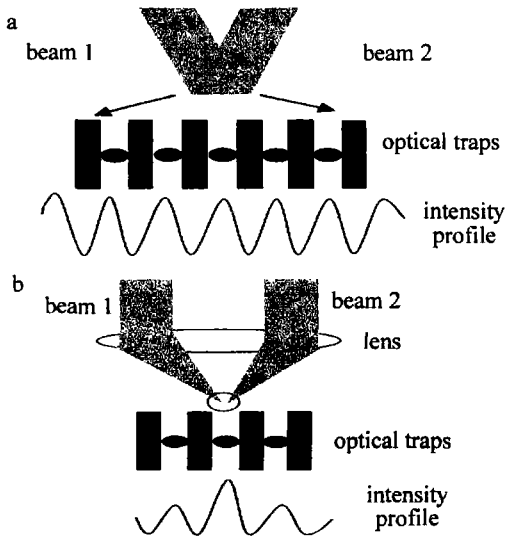


Fig. 1 Schematic illustration of different configuration for optical trapping and the corresponding intensity profiles

a—interference pattern of standing-wave b—focused two-beam interferometric pattern

粒子,以及产生光栅格来囚禁、旋转和分离多个微米级粒子^[4]。实验系统结构如图2所示。

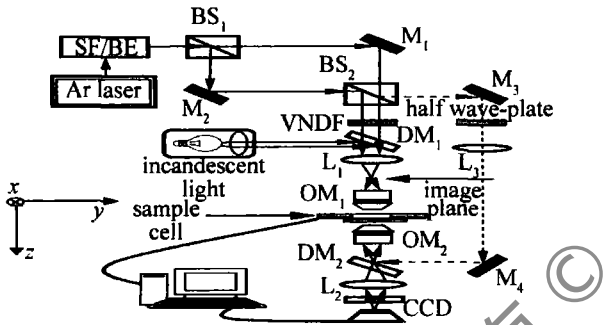


Fig. 2 Experimental configuration of interferometric multiple optical tweezers

选择图2所示坐标系,定义光轴方向为 z 轴方向,侧向分别为 x 和 y 方向,三者符合右手螺旋关系。从氩离子激光器中发出的激光束被空间滤波/扩展器(spatial filter/beam expander, SF/BE)滤波和扩束后再通过分光镜(beam splitter, BS) BS_1 分成功率相等的两束,水平光束(透射光)被反射镜 M_1 反射后再和垂直光束(经过 M_2 反射)通过分光镜 BS_2 重新组合,在调焦透镜 L_1 前形成平行光束。通过调整 M_1 可以调整两束激光束的中心距离 D ,光束强度可以通过可变中性滤光片(variable neutral density filter, VNDF)来调整。接着,这两束光被焦距为25cm的透镜 L_1 汇聚到位于它后面31.5cm处的显微物镜(object mirror, OM) OM_1 的像平面处,这样,在像平面处产生的干涉图像(条纹)被 OM_1 汇聚重现在其后的样品池中,本实验装置中约为原尺寸的1/20。样品池安置在由计算机控制的3维可精确定位平台上,平台定位精度为0.1 μm 。为便于观察,样品池被一束通过分色镜(dichroic mir-

ror, DM) DM_1 和 OM_1 的白炽灯光源照亮。系统的观察部分由显微物镜 OM_2 、分色镜 DM_2 、透镜 L_2 和 CCD 成像系统组成,最终,由 CCD 采集到的图像被送到计算机中进行分析处理。由于光栅的轴向梯度力太小,实际上本装置中的粒子是被推到紧贴样品池的底部的位置,因而以上实验装置只能被称为侧向2维光阱。

2 理论分析

有关样品平面处干涉图像的详细描述如图3所示。图中缩写字母分别代表如下意义: d 为激光束半

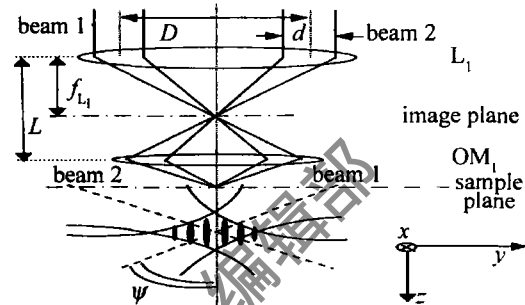


Fig. 3 Scheme of optical interference fringes in the sample plane

径; f_{L_1} 为 L_1 的焦距; L 为透镜1和显微物镜之间的距离; Ψ 为激光束和 z 轴之间的夹角。经过简单的几何光学分析可以得出夹角 Ψ 与两激光束参量以及透镜和显微物镜的关系满足如下方程^[5]:

$$\sin \Psi = \frac{D}{2n} \frac{L - f_{L_1} - f_{OM_1}}{f_{L_1} f_{OM_1}} \quad (1)$$

式中, f_{OM_1} 为显微物镜焦距, D 为两束光束中心距离, n 为样品池中粒子周围媒质的折射系数。由平面波干涉的原理可计算出样品平面处干涉条纹间的宽度 p ^[6]:

$$p = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{2n \sin \Psi} \quad (2)$$

式中, λ_{vac} 是光源在真空中的波长(514nm)。由两束高斯光束干涉所产生的干涉条纹数 N 由下式决定^[7]:

$$N = \frac{2w}{p \cos \Psi} \quad (3)$$

式中, w 为高斯光束在样品平面处的束腰半径。实验中选取 $w = 3.4 \mu\text{m}$, $D = 7 \text{mm}$ ($\Psi \approx 7^\circ$),代入(2)式和(3)式可求出 $p = 1.6 \mu\text{m}$, $N = 4.25$,这些数据与观测结果吻合得很好。2维干涉式光阱计算机仿真结果和示意图如图4所示。

为了得到3维光阱,第3束激光束(图2中虚线所示)被显微物镜2反向汇聚到显微物镜1的焦平面处。为了避免和前面两束光束发生干涉,第3束光被 $\lambda/2$ 波片(half wave-plate, HWP)旋转产生 $\pi/2$ 极化。透镜 L_3 将第3束激光汇聚到距离显微物镜2(OM_2)后孔几厘米处,再经过 OM_2 汇聚到 OM_1 的焦平面处,在焦平面处就会得到与前两束激光干涉产生的条纹尺寸相当

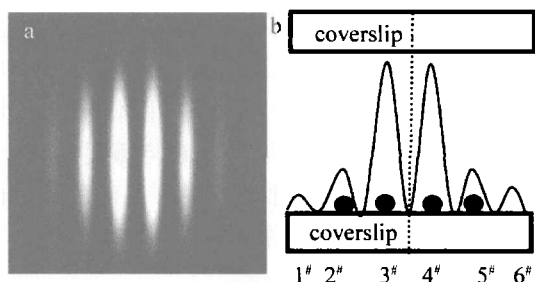


Fig. 4 Simulation pattern and sketch of 2-D optical tweezers trapping
a—computer simulation of the optical fringe pattern b—sketch of 2-D trapping

的光斑,这样就可以得到3维光阱。

3 光阱力实验数据分析

3.1 2维光镊光阱力分析

先由2维光镊入手来进行理论分析。注意到粒子被捕陷的现象只出现在样品池的底部,如图4所示,这是因为在2维光镊实验系统中作用在粒子上的轴向梯度力远远小于轴向散射力,这样,粒子只能在轴向(z 方向)被加速,从而聚集在样品池的下表面。为了更详细地了解光镊的性能,利用流体力学的原理测量了作用在粒子上的 x 轴和 y 轴方向的力,即侧向力的大小。调整控制平台,使样品池沿 x 轴或 y 轴方向以一恒定速度 v 移动,此时粒子受到粘滞力 $F_s = 6\pi\eta Rv$ 的作用而偏离光阱中心,其中, η 是粒子周围液体的粘滞系数, R 是粒子半径。当粒子所受的粘滞力和光阱力相等时粒子在新的位置取得平衡,破坏这种平衡状态的最低速度就是逃逸速度 v_{escape} ,由逃逸速度就可以求出最大粘滞力 $F_{\text{max}} = 6\pi\eta Rv_{\text{escape}}$ ^[8]。图5中给出了第1束和第2束光线的功率 $P_1 + P_2 = 58\text{mW}$ 条件下,测得作用在橡胶小球上沿 y 轴方向的侧向光阱力绝对值的

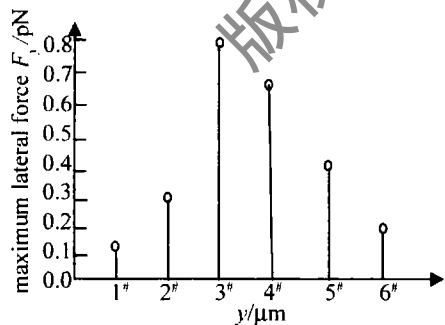


Fig. 5 Maximum measured lateral forces F_y in each fringes along y axis
大小,从图中可以清楚地看出,最大光阱力出现在中央条纹——3#和4#条纹处,这正是激光功率最强的地方,也是沿 y 轴方向梯度力最大的方向。

利用束腰半径 $w = 3.4\mu\text{m}$ 的激光束来研究当样品池沿 x 轴或 y 轴移动时小球所受到的反方向的最大或最小光阱力的变化规律^[9]。假设两激光束完全相同,则最大光阱力 F_{max} 和最小光阱力 F_{min} 是小球沿 z 轴方

向位置的函数,结果如图6所示。图6a中给出了沿 y

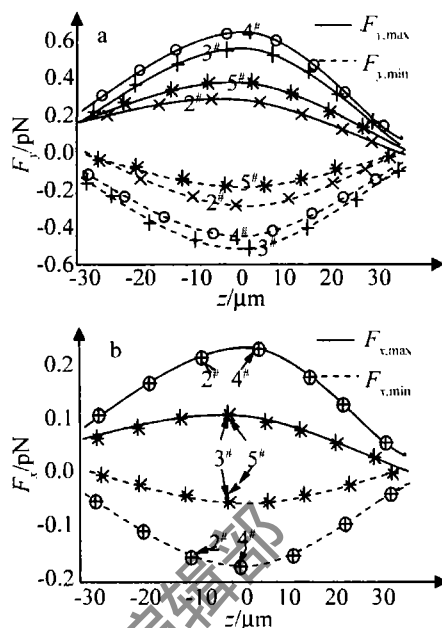


Fig. 6 Dependence of optical force along x or y axis on the position of axis z 方向的最大、最小光阱力 $F_{y,\text{max}}$, $F_{y,\text{min}}$ 与 z 的关系,这与沿 z 轴方向光阱力的实验结果是一致的。由前面的讨论知道,光阱沿 y 轴是对称分布的,但最大、最小值在对称位置并不是完全一致的,图中“+”对应“o”,而“x”对应“*”。还可以看出, $F_{y,\text{max}}(3\#) = -F_{y,\text{max}}(4\#)$, $F_{y,\text{min}}(3\#) = -F_{y,\text{min}}(4\#)$ 。同样的结果还出现在2#和5#条纹位置。如图6b所示,可以看出沿 x 轴光阱力有着类似的关系: $F_{x,\text{max}}(3\#) = -F_{x,\text{max}}(4\#)$ 和 $F_{x,\text{min}}(3\#) = -F_{x,\text{min}}(4\#)$,对于2#和5#条纹也有同样的关系。

3.2 3维光镊光阱力分析

为了得到3维光囚禁,引入了与前两束光线反方向传输的第3束激光束,如图1中虚线所示。调整第3束光线的功率 P_3 到恰好能够抵消沿 z 轴作用在粒子上的散射力,此时,就可以实现粒子的3维囚禁,即3-D光镊^[10]。例如,当取 $P_1 = P_2 = 10\text{mW}$ 时,实验结果证明取 $P_3 = 38\text{mW}$ 即可以实现3维囚禁。

与分析2维干涉式光镊类似,还测量了3维干涉式光镊沿 x 轴和 y 轴的侧向光阱力的大小。在3维光镊中,被囚禁的粒子位于样品池上下表面的中间,距离上下表面大约为 $25\mu\text{m}$,远大于小球半径,因而表面效应的影响可以忽略^[11]。比较2维和3维光阱力的大小发现,对于给定的光功率,不论在 x 轴或 y 轴方向,3维光阱力要比2维光阱力稍大。这是因为在3维情况下第2束光同样提供了侧向梯度力的缘故。

4 结论

给出了1种干涉式光镊的结构原理图,并实验测

量了其光阱力的大小。利用粘滞拖动原理,测量了2维囚禁下6条干涉条纹处粒子所受的最大光阱力,测量数据表明,当只考虑光束的束腰半径和光功率两个因素时,实验数据与理论分析吻合得很好。同时还给出了3维光镊的实验系统,并对系统的一些性能参量进行了理论分析和实验验证。

干涉式多光镊技术适合用来囚禁和操纵两个或多个具有对称形状的条形粒子,它所具有的独特的条状分布的光阱可以非常有效地排列和固定雪茄状粒子,以便于下一步的操作,它还可以用来产生光栅格来囚禁、旋转和分离多个微米级粒子,可广泛应用与生物学、生物医学以及纳米科技等领域^[12-13]。

参 考 文 献

- [1] ASHKIN A, DZIEDZIC J M, BJORKHOLM J E. Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Opt Lett*, 1986, 20(6): 288-290.
- [2] ARTHUR E, CHIOU A, WANG W. Interferometric optical tweezers [J]. *Opt Commun*, 1997, 26(9): 7-10.
- [3] TAN A L, ZHAO Y, SHI J Sh. The analysis of the optical trap force in a single optical trap based on MATLAB [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 373-375 (in Chinese).
- [4] KRONER A, RINALDI F, KARDOSH I, *et al.* Towards ultra-compact optical tweezers without external optics [C]//*Laser and Electro-Optics Europe*, 2005. Munich: CLEO, 2005: 633.

- [5] GARY J, HENRY T, ALAN J, *et al.* Advanced optical tweezers for the study of cellular and molecular biomechanics [J]. *Transaction on Bio-medical Engineering*, 2003, 50(1): 57-62.
- [6] ASHKIN A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particles, atoms, and molecules [J]. *Selected Topics in IEEE J Q E*, 2000, 6(6): 841-856.
- [7] HANSEN P M, FLYVBJERG H. Tweezercalib 2.0: faster version of MATLAB package for precise calibration of optical tweezers [J]. *Computer Physics Communications*, 2006, 47(11): 518-520.
- [8] TAGUCHI K, ATSUTA K, NAKATA T, *et al.* Levitation of a microscopic object using plural optical fibers [J]. *Opt Commun*, 2000, 29(8): 43-47.
- [9] WRIGHT W H, SONEK G J, BERNIS M W. Parametric study of the forces on microspheres held by optical tweezers [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(9): 1735-1748.
- [10] CHIOU A. Photorefractive phase-conjugate optics for optical image processing, trapping, and manipulation of microscopic objects [J]. *Devices and Applications*, 1999, 87(11): 2072-2074.
- [11] ROHRBACH A, KRESS H. Three-dimensional tracking of small spheres in focused laser beams: influence of the detection angular aperture [J]. *Opt Lett*, 2003, 37(5): 411-413.
- [12] BERG-SORENSEN K, FLYVBJERG H. Power spectrum analysis for optical tweezers [J]. *Science Instrument*, 2004, 75(10): 594-612.
- [13] LUO Y Q, WANG W P, LI J F. Investigation of an optical limiting mechanism in carbon nanotube suspension [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 46-48 (in Chinese).

(上接第126页)

3 结 论

(1)对于激光-感应复合熔覆而言,随着激光比能的增加,粉末面密度增加,熔覆层的高度增加,而熔覆层的宽度略有增加,其尺寸仅依赖于垂直于激光扫描速度方向的光斑尺寸。在相同的激光比能下,随着粉末面密度的增加,复合层的高度增加而稀释率减小。而在相同的粉末面密度条件下,随着激光比能的增加,复合层的稀释率增加。

(2)在相同的椭圆光斑尺寸以及激光功率条件下,激光-感应复合熔覆的激光扫描速度约是单纯激光熔覆技术的5倍,其粉末沉积率约是单纯激光熔覆技术的4倍。此外,在激光-感应复合熔覆过程中,熔覆层与基材间的温度梯度仅是单纯激光熔覆技术的1/25,这是采用激光-感应复合熔覆技术,获得无气孔与裂纹的Ni基WC复合层的关键原因。

参 考 文 献

- [1] CHAO M J, YU J M, LIANG E J, *et al.* Effect of Nb₂O₅ on the crack-ing susceptibility of laser clad Fe-based coating [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 568-571 (in Chinese).

- [2] YANG J X, ZUO T C, XU W Q, *et al.* The research of laser cladding Co-base alloy coating on ductile cast iron [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 517-519 (in Chinese).
- [3] ZHAO Y F, CHEN C Z. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 16-19 (in Chinese).
- [4] YOSHIWARA S, KAWANAME T. Method for surface alloying metal with a high density energy beam and an alloy steel: United States, 4750947[P]. 1988-06-14.
- [5] CHOI J, CHOUDHURI S K, MAZUMDER J. Role of preheating and specific energy input on the evolution of microstructure and wear properties of laser clad Fe-Cr-C-W alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(13): 3213-3219.
- [6] ZHOU S F, HUANG Y J, ZENG X Y, *et al.* Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Materials Science & Engineering*, 2008, A480(1/2): 564-572.
- [7] ZHOU S F, HUANG Y J, ZENG X Y. A study of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding with elliptical spot [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(10): 3110-3119.
- [8] COELHO J P, ABREU M A, PIRES M C. High speed laser welding of plastic films [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4/6): 385-395.
- [9] MCDONALD G, HPENDRICKS R C. Effect of thermal cycling on ZrO₂-Y₂O₃ thermal barrier coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1980, 73(2): 491-496.