

基于后焦面法的光阱中微球亚纳米级位移测量方法

刘海军 陈鑫麟 肖光宗* 周健 罗晖

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 为了实现微米级物体快速、高精度位置测量,弥补传统利用CCD成像直接探测法的不足,采用后焦面法实现了光阱环境中微粒小球的位置探测。阐述了后焦面法位置探测的基本原理和实现方法,并搭建实验光路,实现了模拟光阱环境中微米小球位置的快速精确测量。理论分析及实验结果表明:这种方法位置探测分辨率可达80 nm、响应频率达到800 Hz,将其用于光阱环境中微米小球的位置探测是切实可行的。

关键词 测量;后焦面法;位置探测;光阱;散射

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.071204

Particle's Sub-Nanometer Displacement Measurement Based on the Back-Focal-Plane Method in Optical Trap

Liu Haijun Chen Xinlin Xiao Guangzong Zhou Jian Luo Hui

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In order to make up for the disadvantages of traditional CCD method and monitor particle's position quickly and high precisely, back-focal-plane (BFP) method is used to detect the particle's position in an optical trap. The basic principle of BFP method for position detection is explained, then the experimental system is built and the target that detect the particle's position quickly and high precisely is achieved. The experimental result shows that the detection accuracy reaches 80 nm and the response frequency reaches 800 Hz, so it can be used to detect the micro particle's position in an optical trap.

Key words measurement; back-focal-plane method; position detection; optical trap; scattering

OCIS codes 120.6085; 350.4855; 290.2558; 230.5160

1 引言

光阱是由两束强聚焦的激光束组成,其中微粒由于受到聚焦光束的强度梯度力和散射力的作用而被捕获。光阱最早是由贝尔实验室的Ashkin创造出来,1970年,Ashkin等^[1]用对置的两束激光成功地捕获了微粒,由此开创了光阱研究的热潮。微粒的位置探测^[2]是光阱研究的核心内容之一,已有人运用了CCD图像法^[3]、光干涉法^[4]以及类透镜法^[5]来实现光阱中束缚小球位置的测量研究。光干涉法通过测量两束正交偏振光的合光椭圆度来实现微球的位移测量,该方法十分灵敏,但只能实现一维测量,同时不便于实现回馈控制;类透镜法将待测微粒当做透镜,同时利用光束放大实现微小位移测量,但在实验中无法区分横向和纵向位移;CCD图像法直接利用CCD成像测量微球位置,其精度与成本直接相关,同时不便于工程应用等缺点^[6]限制了其适用范围,后焦面法的运用很好地解决了以上缺点。

为了研究微米尺寸小球的微小位移测量精度与最高响应频率,本文基于后焦面(BFP)法设计了微米小球位置探测系统并在模拟的光阱系统中进行实验研究。将探测激光聚焦到聚苯乙烯小球表面,并结合后焦面法利用四象限探测器探测聚苯乙烯小球的位置信号,利用压电位移台驱动小球运动并测量其极限微小位移与最高响应频率。

收稿日期:2015-01-14;收到修改稿日期:2015-03-02;网络出版日期:2015-05-20

作者简介:刘海军(1991—),男,硕士研究生,主要从事光阱方面的研究。E-mail: liuhaijunjude@163.com

导师简介:罗晖(1970—),男,博士,教授,主要从事激光陀螺技术方面的研究。E-mail: luohui.luo@163.com

*通信联系人。E-mail: xiaoguangzong@163.com

2 后焦面法位置测量原理

1996年, Visscher等^[7]在测量光阱中微球位置的研究中利用了后焦面法,其基本方案是利用聚焦透镜把微球对捕获激光产生的散射光聚焦,同时将探测器放置在聚焦透镜的后焦面上,通过测量透镜后焦面上光强的变化即能实现微球的位置探测。后焦面法具有能同时进行多维测量、响应速度快的优势,因此在光阱研究中得到了广泛应用与发展。2004年, Nugent-Glandorf^[8]使用两束激光利用差分后焦面法消除了共模干扰,进一步减小了测量误差。Li等^[9-10]在2010年将探测光分两部分分别进入快速响应光电管,极大地提高了响应频率。

经典后焦面法的基本原理如图1所示,探测激光照射到样本小球表面,经过样本小球散射,并利用聚焦透镜将前向散射光束会聚到光敏元件探测器的光敏面上。当小球发生横向位移时,散射光束的光斑在光敏面上也将发生移动,探测散射光束光斑在光敏面上的位置从而实现了小球的位置探测。

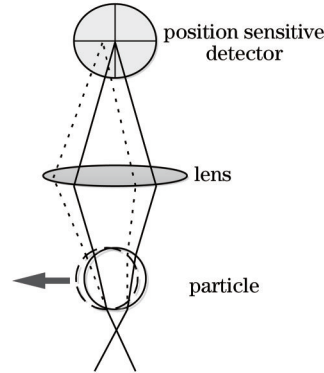


图1 经典后焦面法基本原理图

Fig.1 Traditional BFP diagram

采用四象限探测器(QPD)探测位置信息,出射光束中同时包含小球的前向散射光和非散射光^[11],其探测原理如图2所示。

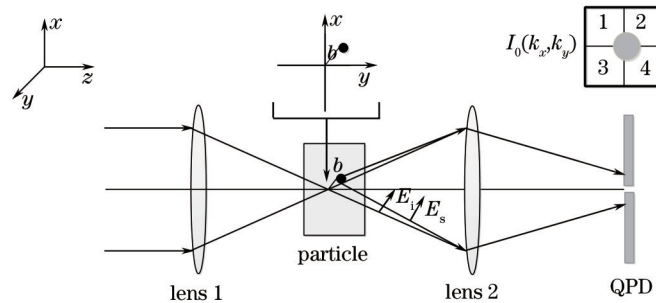


图2 散射原理图

Fig.2 Scattering principle diagram

平行出射的探测光束经过聚焦透镜1会聚到固定有样本小球的玻片上,此时样本小球在垂直于探测光束的传播方向上偏离焦点中心为 b 。一部分光直接被样本小球散射,散射光为 E_s ,另外一部分光未发生散射直接透射出去,透射光为 E_t 。 E_s 与 E_t 两部分光均被聚焦透镜2再次聚焦到四象限探测器的光敏面上,并且在光敏面上发生干涉现象,因此光敏面上的干涉场将随小球的位置改变而发生改变。

四象限探测器所探测到的总光强 $I(k_x, k_y, b)$ 是焦点中心处非散射光场 $\tilde{E}_i(k_x, k_y, z=0)$ 与 b 处散射体的散射光场 $\tilde{E}_s(k_x, k_y, b)$ 的干涉模式决定的。在数值孔径为 NA_c 的聚焦透镜的后焦面处所探测到的光强为

$$I_D(k_x, k_y, b) = \varepsilon_0 c \left[\begin{array}{c} E_{ix}^+(k_x, k_y) + E_{sx}^+(k_x, k_y, b) \\ E_{iy}^+(k_x, k_y) + E_{sy}^+(k_x, k_y, b) \\ E_{iz}^+(k_x, k_y) + E_{sz}^+(k_x, k_y, b) \end{array} \right]^2 \times \text{step}(k_0 NA_c - \sqrt{k_x^2 + k_y^2}) =$$

$$[I_x^+(k_x, k_y, b) + I_y^+(k_x, k_y, b) + I_z^+(k_x, k_y, b)] \times \text{step}(k_0 NA_c - \sqrt{k_x^2 + k_y^2}), \quad (1)$$

式中阶跃函数 $\text{step}(x)$ 表明聚焦透镜的孔径光阑直径为 $k_0 NA_c$ 。

四象限探测器将光强信号按照光敏象限分为4个子信号 $S_1(b), S_2(b), S_3(b)$ 和 $S_4(b)$ ：

$$\begin{cases} S_1(b) = \int_{-k_x}^0 \int_0^{k_y} I_D(k_x, k_y, b) dk_x dk_y \\ S_2(b) = \int_0^{k_x} \int_0^{k_y} I_D(k_x, k_y, b) dk_x dk_y \\ S_3(b) = \int_{-k_x}^0 \int_{-k_y}^0 I_D(k_x, k_y, b) dk_x dk_y \\ S_4(b) = \int_0^{k_x} \int_{-k_y}^0 I_D(k_x, k_y, b) dk_x dk_y \end{cases} \quad (2)$$

因此, 散射体发生任意的位移 b 导致信号变化为 $S(b)=[S_x(b), S_y(b), S_z(b)]$ 。其中,

$$\begin{cases} S_x = [(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)]/S_0 \\ S_y = [(S_1 + S_3) - (S_2 + S_4)]/S_0 \\ S_z = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)/S_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 S_0 是没有发生散射时照射到光敏面上的总光强。 S_x, S_y 分别对应于小球在 x 和 y 方向产生的位移信息, S_z 代表小球在 z 轴方向发生的位移信息。

3 实验与讨论

3.1 系统搭建及数据采集

根据后焦面法原理搭建的实验系统如图3所示。激光器出射的探测激光束经过衰减片衰减后被聚焦透镜1聚焦到聚苯乙烯小球表面, 激光束经过小球散射后被聚焦透镜2聚焦到四象限探测器光敏面上。将四象限探测器的信号输出至数据采集卡, 并配合Labview程序采集数据。

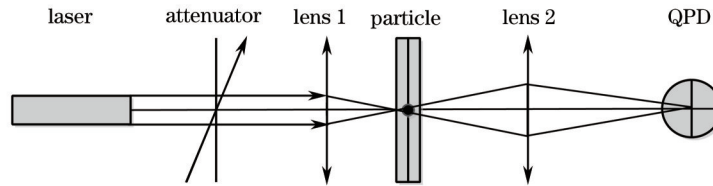


图3 实验系统示意图

Fig.3 Experimental system schematic diagram

实验中, 激光器的输出功率为 230 mW, 输出波长为 512 nm, 经过衰减片后光功率衰减至 1.8 mW。聚焦透镜1、2均是焦距为 40 mm, 直径为 25.4 mm 的凸透镜。样本玻片为玻片上固定有直径为 10 μm 的聚苯乙烯小球组成, 在制作样本玻片时, 在玻片上滴上聚苯乙烯球溶液并用光纤在显微镜下将其他小球粘走, 同时利用 CCD 成像观察样本玻片的制作质量。四象限探测器的波长响应范围为 400~1050 nm, 响应时间为 40 ns, 数据采集卡采样率设置为 1 kHz。

样本玻片由压电位移台驱动, 通过改变其输入电压和频率即能实现聚苯乙烯小球的位置精度和极限响应频率测量。

3.2 实验结果与分析

为了探明经典后焦面法的极限探测精度及极限响应频率, 现输入不同的驱动电压和不同的驱动频率来研究四象限探测器的输出信号, 并根据输出信号与输入信号的对比分析实验误差。

将压电位移台的输入波形选为方波, 在进行位移精度测量时控制驱动频率不变, 不断改变输入电压即输入方波的幅。通过计算输出信号和输入信号的误差即能测量出系统的极限精度, 实验结果如图4所示。

图4(a)~(d)分别表示输入频率为 0.2 Hz 驱动位移为 0.8 μm 、0.3 μm 、80 nm 和 40 nm 时四象限探测器采集到的小球位置信号与压电位移台输入信号的对比, 实线表示压电位移台的输入信号, 散点表示四象限探测器输出信号, 其分布趋势反映了小球的位置信息。将小球实际位移信号进行平均处理, 计算出位移大小, 同时与压电位移台的输入信号标准值相比并计算出测量误差, 其误差列表如表1所示。

由表1可知, 随着输入方波幅值的减小, 测量的误差有逐步增大的趋势。输入幅值大于 80 nm 时, 测量误差均在 5% 以内, 可以认为该系统准确测量了聚苯乙烯小球的位置。当输入方波幅值小于 80 nm 时, 测量误差急剧增大, 当输入方波幅值为 40 nm 时, 测量误差为 12.5%。在实验中, 若进一步减小输入方波信号的幅值, 可以观察到输出信号的噪声明显变大。可以认为该系统在当前实验条件下测量精度可达 80 nm。

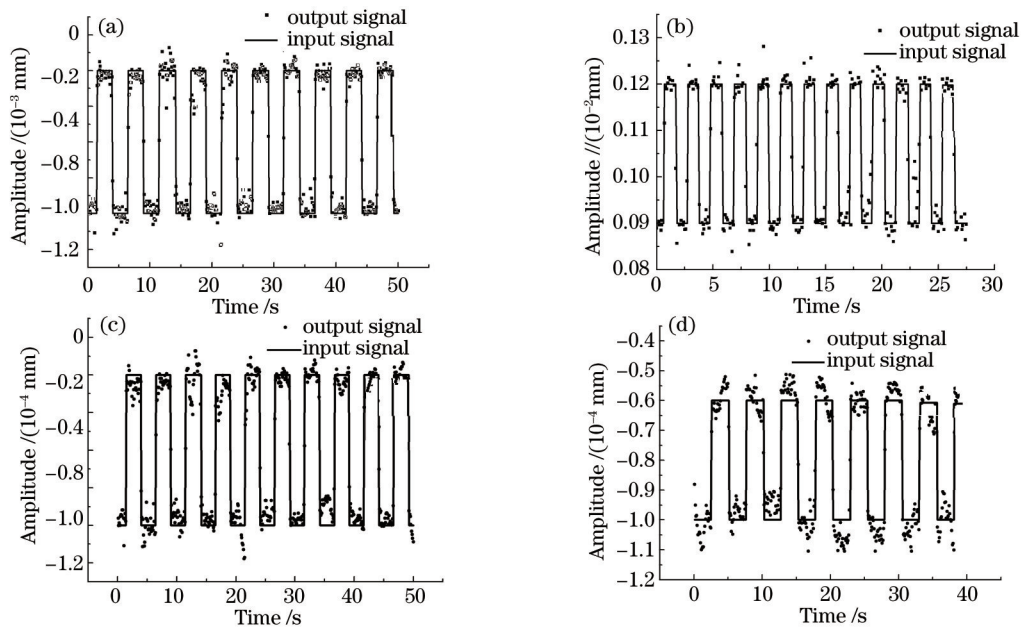


图4 频率为0.2 Hz的方波,在不同输入幅值下的实验结果。(a)输入幅值为 $0.8 \mu\text{m}$; (b)输入幅值为 $0.3 \mu\text{m}$; (c)输入幅值为 80 nm ; (d)输入幅值为 40 nm

Fig.4 Experimental result under different input amplitudes when the square wave's input frequency is 0.2 Hz.

(a) Input amplitude is $0.8 \mu\text{m}$; (b) input amplitude is $0.3 \mu\text{m}$; (c) input amplitude is 80 nm ; (d) input amplitude is 40 nm

表1 不同输入幅值情况下的测量误差对比

Table 1 Position errors under different input amplitudes

Parameter	Value				
Theoretical displacement / μm	0.8	0.4	0.3	0.08	0.04
Measuring displacement / μm	0.811	0.407	0.308	0.076	0.045
Measurement errors %	1.4	1.7	2.7	5	12.5

为进一步探测该系统最高响应频率,现保持压电位移台的驱动电压不变,逐步加大驱动频率,将输出的小球位置信号与压电位移台输入信号进行对比,其结果如图5所示。

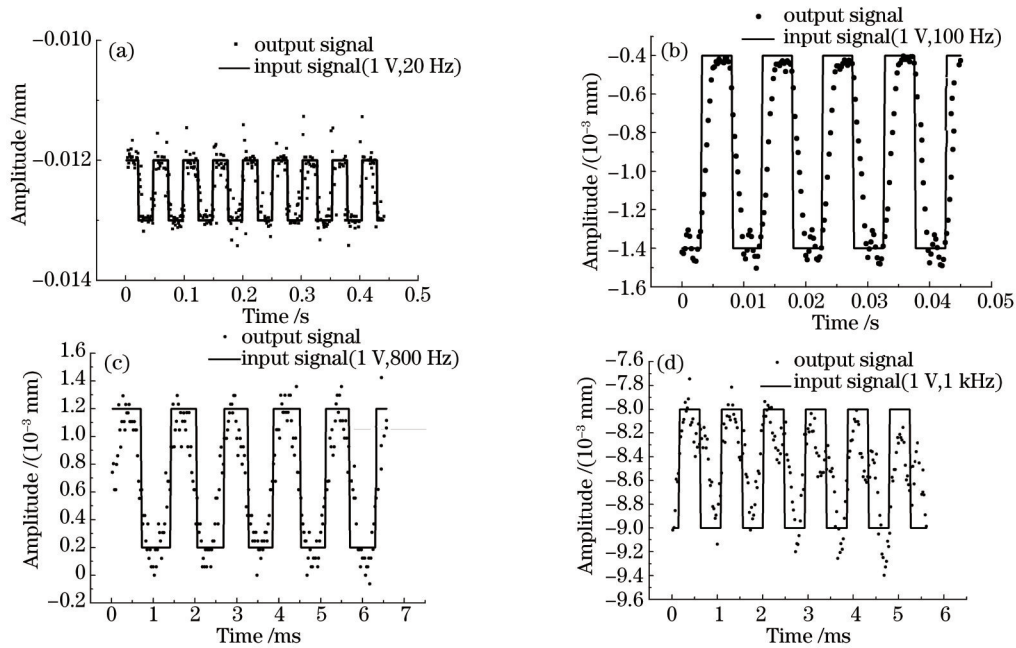


图5 输入电压为1 V的方波,在不同输入频率时的实验结果。(a)输入频率为20 Hz; (b)输入频率为100 Hz; (c)输入频率为800 Hz; (d)输入频率为1 kHz

Fig.5 Experimental result under different input frequencies when the square wave's input voltage is 1 V. (a) Input frequency is 20 Hz; (b) input frequency is 100 Hz; (c) input frequency is 800 Hz; (d) input frequency is 1 kHz

图5(a)~(d)的输入电压均为1 V,输入频率分别为20 Hz、100 Hz、800 Hz和1 kHz。由图5可知,当最高输入频率低于800 Hz时,输出信号能准确反映输入信号的波动趋势,且延迟较小。当输入信号频率高于800 Hz时,信号失真较严重。从图5(d)中可以发现,当输入信号为1 kHz的方波时,输出信号与输入信号相比严重失真,因此该系统的最高响应频率可达800 Hz。与CCD测量结果相比,响应频率有了大幅提升。

4 结 论

为了实现微米级物体快速、高精度位置测量,弥补传统利用CCD成像直接探测法的不足,根据后焦面法的基本原理搭建了实验系统,实现了模拟光阱环境中微米小球位置的快速精确测量。理论分析及实验结果表明:这种方法位置探测分辨率可达80 nm、响应频率达到800 Hz,将其用于光阱环境中微球的位置探测是切实可行的。

参 考 文 献

- 1 A Ashkin, J M Dziedzic, J E Bjorkholm, *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(5): 288-290.
- 2 Lucien P Ghislain, Neil A Switz, Watt W Webb. Measurement of small forces using an optical trap[J]. *American Institute of Physics*, 1994, 65(9): 2762-2767.
- 3 Monica Nadasan, Revati Kulkarni, Ovidiu Lancu. Nanometer movements detection by back focal plane interference in laser tweezers[C]. *SPIE*, 2006, 6254: 62540B.
- 4 Graham M Gibson, Jonathan Leach, Stephen Keen, *et al.*. Measuring the accuracy of particle position and force in optical tweezers using high-speed video microscopy[J]. *Opt Express*, 2008, 16(9): 14561-14570.
- 5 Karel Svoboda, Christoph F Schmidt, Bruce J Schnapp, *et al.*. Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry[J]. *Nature*, 1993, 365(6448): 721-727.
- 6 M W Allersma, F Gittes, M J deCastro, *et al.*. Two-dimensional tracking for ncd motility by back focal plane interferometry[J]. *Biophys J*, 1998, 74(2): 1074-1085.
- 7 Koen Visscher, Steven P Gross, Steven M Block. Construction of multiple-beam optical traps with nanometer-resolution position sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 1996, 2(4): 1066-1076.
- 8 Nugent-Glandorf, T T Perkins. Measuring 0.1 nm motion in 1ms in an optical microscope with differential back-focal-plane detection[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2611-2613.
- 9 T Li, S Kheifets, D Medellin, *et al.*. Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle[J]. *Science*, 2010, 328(5986): 1673-1675.
- 10 M J Lang, C L Asbury, J W Shaevitz, *et al.*. An automated two-dimensional optical force clamp for single molecule studies[J]. *Biophys J*, 2002, 83(1): 491-501.
- 11 Alexander Rohrbach, Ernst H K Stelzer. Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles[J]. *J Appl Phys*, 2002, 91(8): 5474-5488.

栏目编辑: 何卓铭