

光镊系统中光放大倍数对测量结果的影响*

刘春香^{1)†} 郭红莲¹⁾ 降雨强²⁾ 李兆霖¹⁾ 程丙英¹⁾ 张道中¹⁾

¹⁾中国科学院物理研究所和凝聚态物理中心光物理开放实验室,北京 100080)

²⁾山西大学量子光学与量子器件国家重点实验室,物理电子工程学院,太原 030006)

(2004 年 6 月 14 日收到,2004 年 8 月 9 日收到修改稿)

从实验和理论两方面,讨论了在光镊系统中,光放大倍数在 500—1000 倍、间隔为 100 倍的范围内,对四象限探测器位移测量信号的幅值及其线性度的影响.实验结果与理论结果符合很好,得出相同的结论:当微粒的影像半径约为四象限探测器探头半径(50—60)%时,可以得到幅值大、线性好的输出信号.

关键词:光镊系统,放大倍数,四象限探测器

PACC:4230,4260

1. 引言

在光镊系统中,一束扩束的平行激光经过高数值孔径的显微物镜,聚焦到水溶液中的透明微粒上,若微粒的折射率大于周围介质的折射率,则由光与物质间的动量传递而产生光阱束缚力^[1].光镊以其非接触、无损伤的优点在生物细胞、亚细胞以及生物大分子等研究领域中得到越来越广泛的应用^[2-7].实验中通常把微米量级的聚苯乙烯小球粘接到生物体上作为“手柄”来进行操纵,并通过测量小球的运动和所受的力来研究生物体的运动学和动力学性质.在利用光镊系统进行力和位移的测量时,通常要求系统具有很高的精度和稳定度,因此,尽可能地提高位移测量信号的信噪比,同时保证测量系统有足够快的响应速度成为重要问题.目前,通常采用图像灰度重心法^[8,9]和四象限探测器(QD)^[9,10]来测量小球的位移.在利用 QD 测量位移信号时,由于小球影像和背景的照度差较小,所以代表小球位移的电信号很小,可以采用不同的方法来获取较大的位移信号,如增加照明光强,但这种增加是有限的,且会引起局部温度的升高,从而增加热扰动;另外,有关文献中提到在光电流-电压转换电路中增大反馈电阻 R ,可使信噪比按 \sqrt{R} 增加,但同时会使电路的响应速度变慢,而通过选择适当的光放大倍数来获取较

大的位移信号不会带来负面影响,因此,研究在成像 CCD 位置处的光放大倍数的合理选取成为一个重要问题.相关文献中提到小球所成的影像应约占 QD 探头面积的 1/2,若小球直径为 $1\mu\text{m}$,QD 探头直径为 1mm,则光放大倍数应选择在 700 倍^[9,10],但没有说明这样选取的理由.本文提出了一种理想成像模型,模拟计算了不同光放大倍数对 QD 输出信号的幅值和线性度的影响.将实验测量结果与理论计算结果进行比较,发现两者符合较好,说明理想成像模型可以近似的模拟实际复杂的成像情况,从理论和实验结果得出,当小球影像的半径约为 QD 探头半径的(50—60)%时,可以获得幅值大、线性好的输出信号.

2. 实验装置与理想成像模型

光镊系统示意图如图 1 所示.图 1 中 L_1 与 L_2 构成扩束透镜组,使光束充满物镜后瞳,从而增加光强梯度,即提高光阱效率. L_3 与透镜 T 共焦.成像光源经聚光镜 C_1 和 C_2 会聚,照在样品池上,光阱中的小球经过物镜在透镜 T 的后焦面上一次成像为放大 100 倍的实像,再经 L_4 放大数倍后二次成像到 QD 探头或 CCD 的光敏面上.

QD 的电路原理^[10]为小球影像产生的光电流首先经过四路电流-电压转换电路经取样电阻 R 转换

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2002CB713805)和国家自然科学基金(批准号:30174097 和 10374112)资助的课题.

†E-mail: chxqr@aphy.iphy.ac.cn

成电压,然后经求和电路求和并放大 a_e 倍,最后再经取差电路得到代表小球在平面直角坐标上的位置 (x, y) 的输出信号.此信号经过 HY8201 多路 12 位 A/D 转换电路,用计算机采集、存储.在实验中,通常采用离焦成像的方法来提高小球影像与背景的照度差,即通过移动透镜 L_4 ,得到灰度较为均匀且与背景对比度最大的小球影像,从而获得较大的光电流信号.如果小球的影像沿 x 方向偏移 QD 中心右侧,则左侧两个象限的光电流比右侧的强,反之亦然.沿 y 方向的偏移情况类似.可见,由 QD 探测到的光电流信号的变化可以反映小球偏移 QD 中心的位移.

当小球影像偏离 QD 中心在 x 轴方向移动距离为 x 时,输出电压的表达式为

$$V_{out}(x) = 4q(x)SenR_s a_e, \quad (1)$$

其中 Sen 为光二极管的灵敏度; R_s 为第一级运算放大的反馈电阻; a_e 为位置判别电路的放大倍数; $q(x)$ 为单路光电二极管光敏面上光功率的改变量,表示为

$$q(x) = q_1(x) - q_2(x) = 2(I_m - I_n)\Delta S, \quad (2)$$

其中 $q_1(x), q_2(x)$ 分别为小球影像和背景光功率的改变量; I_m, I_n 分别为小球影像和背景的光强; ΔS 为小球影像偏移 QD 中心时的面积改变量.

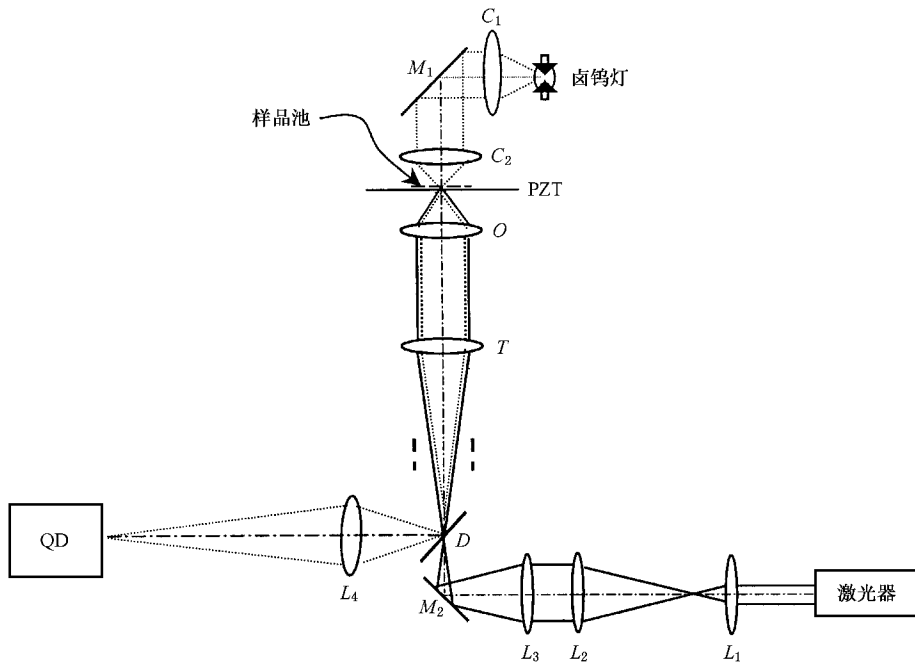


图1 光镊系统示意图 L_1, L_2 为扩束透镜; M_1, M_2 为反射镜; L_3 与透镜 T 共焦; O 为物镜(HCXAPO 100 \times /1.30); C_1, C_2 为聚光镜; D 为分光镜; L_4 为二次成像透镜;PZT 为三维压电陶瓷驱动平台,作为微操作与校准力的工具,QD 为四象限探测器,实线为激光光路,虚线为成像光路

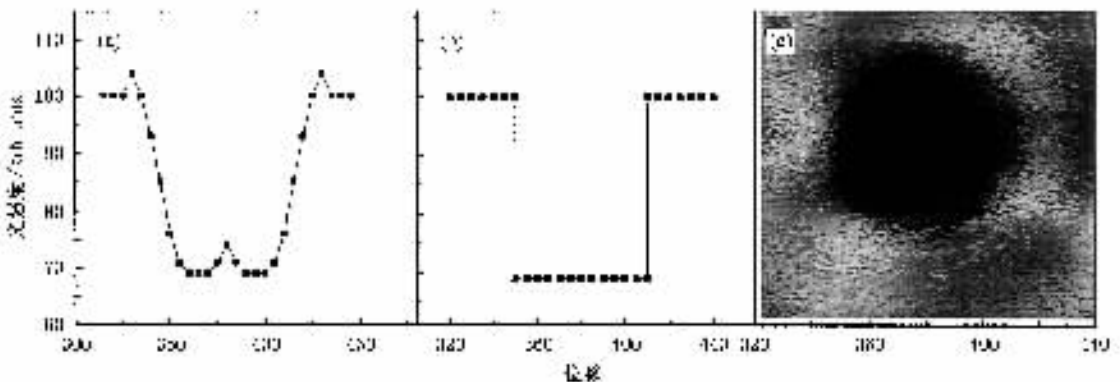


图2 (a) 光强度沿小球影像径向的变化曲线 (b) 小球影像相应的理想成像模型和 (c) CCD 拍摄的光放大倍数 $A = 500$ 倍时的小球影像

一般情况下,由于小球影像的光强度不完全均匀,因此 $|q_1(x)| \neq |q_2(x)|$,而计算 $q_1(x)$ 和 $q_2(x)$ 也极其复杂.图2(a)为光放大倍数 $A = 500$ 倍时,CCD拍摄的小球影像(如图2(c)所示)沿径向的光强度的变化.从图2(a)可以看出,小球影像中心的光强度略有增强,这是由于小球可视为微小的透镜^[1]照明光在小球中心会聚引起的;小球影像的边界模糊变宽是由边缘效应引起的;另外,由于成像光源是柯勒照明,非平行照明光在小球边缘产生反射,从而引起影像边缘的强度略高于背景的强度.为简便起见,本文提出一种理想的成像模型来近似模拟实际所成的影像,假定小球影像的光强度均匀,且入射孔径角不随光放大倍数的改变而改变.图2(b)为图2(a)中小球影像相应的理想成像模型.

3. 实验结果

本文对在成像 CCD 位置处的不同光放大倍数对 QD 输出信号的幅值及线性度的影响进行了实验研究.实验中显微物镜前的激光功率为 80mW,成像光源电压为 8V, QD 探头和小球的直径分别为 1mm 和 $1\mu\text{m}$.由对称性可知,小球影像沿 QD 的 x, y 轴向偏移时光电流信号的变化完全相同,因此,本文仅研究不同放大倍数的小球影像沿 x 轴向偏移 QD 中心这一过程中, QD 探测的电信号与小球偏移光阱中心的位移的关系.另外,由于光放大倍数小于 500 倍时,小球影像的直径小于 QD 的半径,当小球影像移动至完全处于 QD 的左半平面或右半平面时,影像的移动不再引起面积的改变,即 $\Delta S = 0$ 相应的光电流恒定不变,则 QD 的输出信号不能够完全反映小球位移的实际变化情况,所以,我们选取光放大倍数 $A = 500\text{—}1000$ 倍,且间隔为 100 倍的情况进行研究,结果如图 3 所示.从图 3 可以看出,在同一放大倍数下,随着小球偏离 QD 中心位移的增加,输出信号的幅值开始也不断增加,当增加到某一值时,信号达到最大,然后逐渐减小,当小球的影像完全移出 QD 时,信号变为零.随着光放大倍数的增加,输出信号的峰-峰值逐渐减小,且线性区的线性度也逐渐变差.实验中选取放大倍数时,既要考虑信号幅值随小球移动的变化率,又要考虑输出信号的线性度.为了选取最佳的光放大倍数,我们对不同放大倍数下关系曲线中光阱工作较好的区域 $\pm 0.25\mu\text{m}$ 进行直线拟合^[9],由于 $A = 800\text{—}1000$ 倍时输出信号太小,不

是理想的选择,所以只对 $A = 500\text{—}700$ 倍的情况进行研究. $A = 500\text{—}700$ 倍的线性区域的直线拟合斜率分别为: 2.02 ± 0.03 , 1.83 ± 0.02 和 $1.33 \pm 0.04\text{mV/nm}$,若将线性区两端的实验测量值偏离直线拟合的差值与相应拟合值的比值定义为最大非线性偏差,则最大非线性偏差分别为 0.95%, 1.2% 和 3.8%.可以看出, $A = 500\text{—}600$ 倍时线性好,且随小球位移的增加 QD 输出信号幅值的变化较大,所以放大倍数选择在这一范围能够获得较为理想的输出信号.

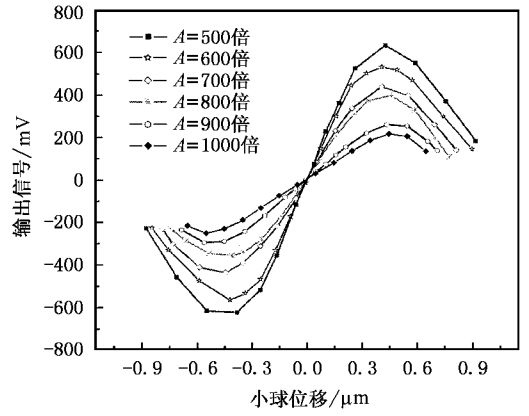


图 3 不同光放大倍数下 QD 的输出信号与小球偏离光阱中心位移的实验关系曲线

4. 理论结果

根据图 2(b)所示理想成像模型,本文对在成像 CCD 位置处的不同光放大倍数对 QD 输出信号的影响进行了理论研究.在(1)和(2)式中,面积改变量 ΔS 随着小球影像偏离 QD 中心而逐渐增大, I_m 和 I_n 均与放大倍数的平方成反比,其他参数与放大倍数无关.首先计算出不同光放大倍数下小球影像沿 x 方向偏移 QD 中心时的面积改变量 ΔS ,然后根据(1)和(2)式即可得到相应的 QD 输出信号,如图 4 所示.从图 4 可以看出,理想成像下得到的理论结果与实验测量的结果符合较好,其中的细小差别是由小球实际所成的影像与理想成像模型本身存在一定的差别引起的.分别对 $A = 500\text{—}700$ 倍的关系曲线中 $\pm 0.25\mu\text{m}$ 的区域进行直线拟合,直线拟合斜率分别为: 1.948 ± 0.005 , 1.948 ± 0.005 和 $1.938 \pm 0.006\text{mV/nm}$,最大非线性偏差分别为 1.4%, 1.4% 和 3.6%.可见,小球影像的半径约为 QD 半径的(50—

60)%时,可以获得幅值大且线性好的输出信号.

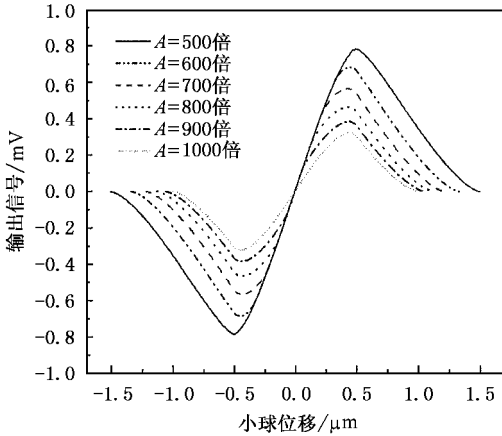


图4 不同光放大倍数下 QD 的输出信号与小球偏离光阱中心位移的理论关系曲线

5. 结 论

本文从实验和理论两方面对在成像 CCD 位置处的不同光放大倍数对 QD 输出信号的影响作了较为详细的讨论.由实验结果得出当小球影像的半径约为 QD 半径的(50—60)%时,可以获得幅值大、线性好的输出信号,这与现有的结论有所不同.根据小球实际所成的影像提出了一种理想成像模型,并进行了理论计算,得到了不同光放大倍数下 QD 的输出信号与小球位移的关系曲线.理论结果与实验测得的结果符合很好,这说明简单的理想成像模型能够近似地模拟实际复杂的影像.本文的结论为利用光镊系统进行生物活体样品及光镊系统本身的研究提供了有益的参考.

- [1] Ashkin A , Dziedzic J M , Bjorkholm J E and Chu S 1986 *Opt. Lett.* **11** 288
- [2] Ashkin A and Dziedzic J M 1987 *Science* **235** 1517
- [3] Ashkin A , Dziedzic J M and Yamana T 1987 *Nature* **330** 769
- [4] Finer J T , Simmons R S and Spudich J A 1994 *Nature* **368** 113
- [5] Hochmuth R M , Shao J Y , Dai J W and Sheetz M P 1996 *Biophys. J.* **70** 358
- [6] Henon S , Lenormand G , Richert A and Galler F 1999 *Biophys. J.*

76 1145

- [7] Kawaguchi K and Ishiwata S 2001 *Science* **291** 667
- [8] Gelles J , Bruce J and Sheetz M P 1988 *Nature* **331** 450
- [9] Dai J W and Sheetz M P 1998 *Methods in Cell Biology* **55** 157
- [10] Simmons R M , Finer J T , Chu S and Spudich J A 1996 *Biophys. J.* **70** 1813
- [11] Hayashi S , Kumamoto Y , Yoshimura T and Hirai T 1991 *J. Colloid Interface Sci.* **144** 538

Effect of optical magnifications on the displacement measurements in optical tweezers system^{*}

Liu Chun-Xiang¹⁾ Guo Hong-Lian¹⁾ Jiang Yu-Qiang²⁾ Li Zhao-Lin¹⁾ Cheng Bing-Ying¹⁾ Zhang Dao-Zhong¹⁾

¹⁾*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

²⁾*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*

(Received 14 June 2004; revised manuscript received 9 August 2004)

Abstract

The effect of different optical magnifications on the amplitude and linearity of displacement signals measured by the photodiode quadrant detector in an optical tweezers system is studied both experimentally and theoretically. Based on the experimental results we find that the output signal with larger amplitude and more preferable linearity can be obtained when the magnified images of α particle have diameters of 50% to 60% of the detector diameter. Theoretical calculation confirms it.

Keywords : optical tweezers , magnifications , quadrant photodiode detector

PACC : 4230 , 4260

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2002CB713805), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10174097 and 10374112).