

光阱位置操纵系统的研究

姚新程, 李兆霖, 郭红莲, 程丙英, 张道中

(中国科学院物理研究所凝聚态物理中心, 北京 100080)

摘要: 利用 He-Ne 激光器, 在 LEICA DMIRBE 倒置显微镜上建立了可对生物样品进行三维操纵的光镊系统。在光镊的研制过程中, 我们重点对光阱的横向位置操纵系统进行了研究。理论分析及实验表明, 利用平移反射镜及转动反射镜的方案均可实现光阱位置的横向操纵。本文对平移反射镜及转动反射镜实现光阱位置操纵的机理进行了详细的论述, 并对操纵过程中保证光阱质量不发生变化的条件进行了理论分析和说明。此外, 比较分析表明, 与平移反射镜系统相比, 转镜系统在光镊技术中的应用可加快光镊操纵速度、简化光阱位置操纵系统的复杂程度、有利于系统开发成本的减少及开发周期的缩短。

关键词: 阱位操作系统; 光镊; 光阱

中图分类号: Q631 **文献标识码:** A

1 引言

由于可实现对生物样品的非接触、无损伤操纵及可进行微作用力、微小位移的定量测定等优点, 光镊已引起人们的热切关注, 作为一种新兴的技术手段正日益广泛地在生物医学研究领域得到广泛的应用^[1-2]。为了配合我国生物医学工作者开展这方面的工作, 我们进行了光镊系统的研制工作。

人们已从不同的角度对光作用力的理论^[3-5]及光镊系统^[6-8]进行了研究。捕获在光阱中的样品将随光阱位置的变化而移动。在生物研究过程中, 经常需要精确地移动和控制生物样品位置, 特别是在双光镊操作系统中, 不仅需要每个光阱的位置进行精确而灵活的操纵, 同时还需精确定量地控制和改变两个光阱间的相对距离。此外, 对光阱位置进行有效而精确的操纵还是定量测定生物作用力、微小位移的前提, 所以研制性能可靠的光阱位置操纵系统具有十分重要的实际意义。

平移反射镜实现光阱位置的横向操纵已有文献^[2]提及, 但未对其机理给以具体说明, 也未对保证光阱质量的条件加以论述。本文首先对光镊系统的构成进行了简要的介绍, 然后对平移反射镜及转动反射镜实现光阱位置横向操纵的机理进行

了详细的阐述和比较。此外, 本文还对光阱位置操纵过程中保证光阱质量不变的条件进行了具体的分析和说明。

2 光镊系统的构成

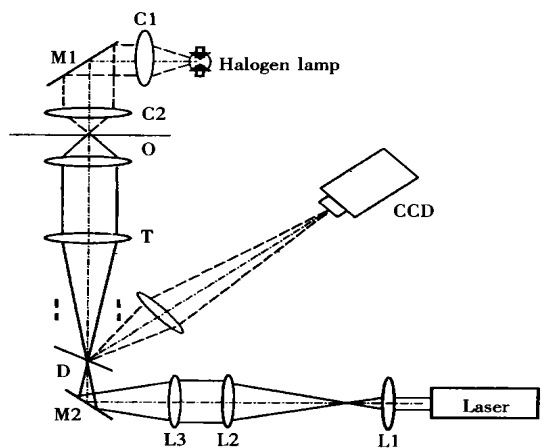


Fig. 1 Schematic diagram of an optical tweezers system

我们采用波长为 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 的 He-Ne 激光器, 在 LEICA DMIRBE 倒置研究型显微镜的基础上构建了可对样品进行三维操纵的光镊系统。图 1 中, 卤钨灯、C1、C2 组成科勒照明系统以

在样品面获得均匀的照明场;透镜 L_1 、 L_2 构成激光扩束系统;透镜 L_3 、 T 焦点重合;若忽略激光的发散,物镜 O 接收的激光为平行光束,平行激光束经物镜会聚而形成光阱。在我们的系统中透镜 L_1 、 L_2 、 L_3 、 T 及物镜 O 的焦距分别为 $f_1 = 50\text{mm}$, $f_2 = 40\text{mm}$, $f_3 = 200\text{mm}$, $f_T = 200\text{mm}$, $f_0 = 2\text{mm}$ 。此外, D 为一谱段选择分束镜, CCD 完成对操作过程的动态监视。

3 光阱位置三维操纵系统的实现

3.1 光阱纵向位置的操纵

光阱纵向位置的控制可通过物镜调焦来实现,我们所采用的 LEICA DMIRBE 型显微镜具有马达电动调焦功能,其液晶显示精度为 $1\mu\text{m}$,实际经验表明利用此调焦系统可对光阱纵向位置进行小于 $0.1\mu\text{m}$ 的操纵。

3.2 光阱横向位置的操纵

光阱的横向位置可采用平移及转动反射镜来实现。

3.2.1 平移反射镜实现光阱横向位置的操纵

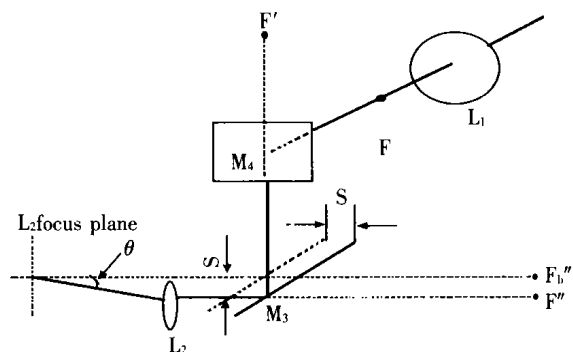


Fig. 2 Optical trap transverse position is steered by laterally moving mirror

如图 2 所示,可用的反射镜 M_3 和 M_4 组成一光阱横向位置操纵装置。其中 M_3 、 M_4 镜面均同水平面呈 45° 夹角,且激光束中心光线对应的反射面相互垂直。 M_3 、 M_4 分别沿 L_1 、 L_2 光轴的水平移动将引起光束相对透镜 L_2 光轴的平移,光束经透镜 L_2 折射后与其光轴产生一倾角 θ ,这将最终决定光阱位置的移动,其中 M_3 、 M_4 分别实现 x 、 y 方向的横向移动。在此,以平移 M_3 为例来进行讨论,图 2 中分别用斜虚线表示反射镜 M_3 的基准位置,设 M_3 处于基准位置时激光束的中心光线同系统光轴重合。为了便于分析,我们在图 2 中做出了焦点 F 关于 M_4 的镜向点 F' ,以及 F 关于反射镜 M_3 及其基准位置的镜向位置 F'' 、 F_b'' 。

M_3 的平移量 S 与相应光阱位移量 d 的定量关系可采用解析法和图解法进行分析。出于直观性的考虑,在此我们采用图解法来进行分析,图 3 所示为将系统光轴等效到同一水平面线时,激光束中心光线的追踪示意图。

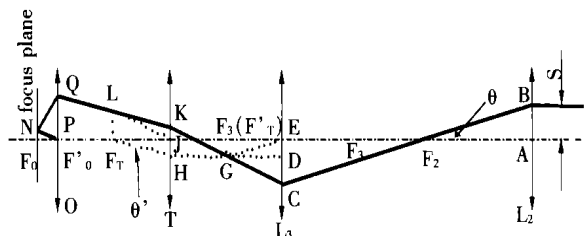


Fig. 3 Routes of the central ray of laser beam

为了便于分析我们将透镜均视为理想薄透镜。图 3 中, F_0 、 F_0' 、 F_T 、 F_T' 、 F_3 、 F_3' 、 F_2 、 F_2' 分别为物镜 O 、辅助物镜 T 、透镜 L_3 和 L_2 的前后焦点;点 P 、 J 、 E 、 A 分别为物镜 O 、辅助物镜 T 、透镜 L_3 和 L_2 的中心;此外 $BC \parallel EG$ 、 $KC \parallel JL$ 、 $KQ \parallel HF_T \parallel PN$ 、 $DH \parallel EJ$; N 、 L 、 G 分别在物镜 O 、辅助物镜 T 、透镜 L_3 的前焦面上。

因为激光束的会聚点在 L_2 的后焦平面上,且 L_2 的后焦平面同物镜的前焦平面共轭,所以激光束中心光线同物镜前焦平面的焦点 N 即为光阱位置。

由 $\triangle ABF_2 \cong \triangle F_3GE$, 及 $\triangle NF_0P \cong \triangle HJF_T$ 知

$$\frac{\tan \angle NF_0P}{\tan \angle BF_2A} = \frac{f_3}{f_T} \quad (1)$$

结合图 1 知, $|AB| = s$, 则

$$\tan \angle BF_2A = \frac{s}{f_2} \quad (2)$$

则 M_3 平移量 S 同相应光阱位移量 d 的关系为

$$d = |F_0N| = \frac{f_0 \cdot f_3 \cdot s}{f_2 \cdot f_T} \quad (3)$$

3.2.2 利用转镜实现光阱横向位置的操纵

忽略激光发散度的影响, L_2 和 L_3 间可视为平行激光束,由以上分析知 L_2 和 L_3 间激光束对系统光轴的倾角 θ 决定了其在物镜焦面会聚点,即光阱的横向位置。由此,我们可在 L_2 和 L_3 间采用如图 4 所示的转镜系统来产生倾角 θ , 以达到改变光阱位置的目的。

图 4 中, M_5 处于基准位置(虚线所示)时激光束的中心光线同系统光轴重合。由反射定律知,反射镜 M_5 相对基准位置转动 $\theta/2$ 将使激光束相对透镜 L_5 的光轴转动 θ 角,其对应光阱位移量为

$$d = \frac{f_0 \cdot f_3}{f_t} \tan \theta \quad (4)$$

可分别转动图 4 中 M_5 、 M_6 来分别实现光阱横向二维操纵,也可将 M_5 选用一个二维转镜来实现光阱横向的二维操纵。

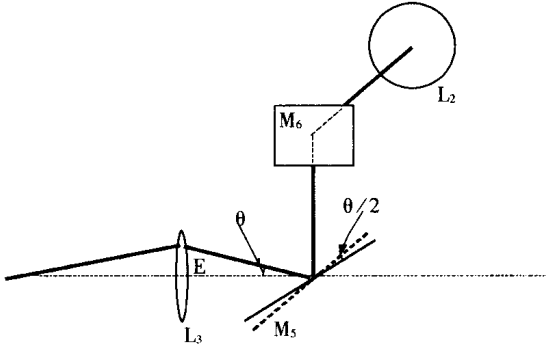


Fig. 4 Optical trap transverse position is steered by rotating mirror

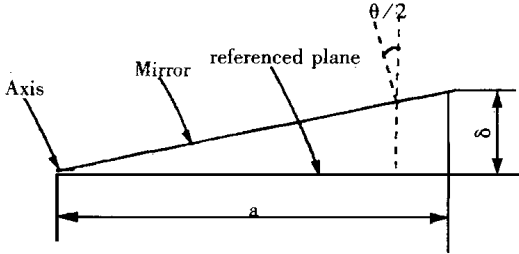


Fig. 5 Schematic diagram of rotating mirror system

通常,转镜系统采用图所示结构,反射镜架的一端同转轴连接,另一端通过顶杆同基准面连接。其中, a 为转镜基准面的边长, δ 为顶杆同反射镜的接触点到基准面的距离。 δ 的变化使转镜法线方向同基准面的法线方向转动 $\theta/2$ 角,其关系为:

$$\tan(\theta/2) = \frac{\delta}{a} \quad (5)$$

当 δ 的变化很小时,由式(5)、(6)知其对应光阱位移量可近似表示为

$$d = \frac{f_0 \cdot f_3 \cdot 2\delta}{f_t \cdot a} \quad (6)$$

3.2.3 获得高稳定性光阱对系统参数的要求

在对光阱进行横向操纵的过程中,影响光阱质量的主要因素有两个:(1)激光束的倾斜引起物镜入瞳内光强的下降;(2)激光束的中心光线偏离物镜入瞳中心引起物镜入瞳内光强分布的变化。

首先来看激光束的倾斜对物镜入瞳内光强的影响。

设激光垂直入射时,物镜入瞳一面元上光强为 dI ,当激光束同光轴呈角度 θ 入射时,则物镜入瞳相应面元上光强为

$$dI = dI \cos \theta \quad (7)$$

相应光阱位置的变化为

$$d = f_0 \cdot \tan \theta \quad (8)$$

由于只需在很小的范围内对光阱位置进行操纵所以 θ 的变化一般较小,比如光阱横向位置改变 $10\mu\text{m}$ 时,则需 θ 的相应值为 0.005rad ,由式(8)知相应光强仅变化十万分之一。由此,在实际实验中可忽略激光束的倾斜对物镜入瞳内光强的影响。

再来看激光束的中心光线偏离物镜入瞳中心引起物镜入瞳内光强分布的变化。

由于激光的模式具有中心对称性,所以当激光束的中心光线偏离物镜入瞳中心时将引起物镜入瞳内光强分布的变化,特别是在物镜入瞳内光强分布将失去中心对称性。在对光阱横向操纵的过程中要保证光阱具有良好对称性及稳定的强度,则需要激光束的中心光线始终穿过物镜入瞳中心,即要求图 3 中 Q 点同物镜中心 P 重合。

由高斯光学理论易知物镜中心 P 关于透镜 T 、 L_3 所构成系统的共轭点 P' 位于系统光轴上,其处于透镜 L_3 右方,同 L_3 距离为

$$\Delta = f_3 - \frac{f_3^2(f_0 + F_0 F_T)}{f_T^2} \quad (9)$$

显然,对于平移转镜系统而言,只要满足透镜 L_3 到透镜 L_2 的左焦点 F_2 的距离 $EF_2 = \Delta$ 便可保证激光的中心光束穿过物镜中心。对于转镜系统来讲,需满足 $ER = \Delta$,其中 R 为图 4 中转镜 M_5 的转轴置。

4 结 论

以上分析表明,平移反射镜及转镜系统均可实现光阱位置的横向操纵。在实际应用的范围内,物镜入瞳处激光束的倾斜所引起光强下降对光阱质量影响不大。只要满足条件 $EF_2 = \Delta$ 、 $ER = \Delta$,便可分别保证平移反射镜及转镜系统中激光中心光线始终穿过物镜中心,这样即可消除物镜入瞳内光强分布变化的发生。

此外,平移反射镜及转镜系统比较而言,转镜系统具有以下优点:

(1) 易于横向二维操作系统的实现

对平移反射镜系统而言需要对两个独立的反射镜进行平移操作才可实现二维操纵,而一个二维转镜即可实现光阱横向位置的二维操纵;

(2) 结构简单、成本低廉

较平移系统而言转动系统结构简单,可大大降低系统成本。

(3)可大幅度提高光阱横向位置的操纵速度
为了减小光阱位置操纵时对系统稳定性的影响,可采用超声马达来驱动转镜或平移反射镜,即由马达系统提供 δ 和 s 的变化量。根据式(3)、(6)知若采取同一型号的马达来驱动反射镜的转动和平移,在相同的工作条件下,光阱位置的变化速度

为 f_2/a_0 。在我们的系统中 $f_2 = 400\text{mm}$, 选用 $a = 40\text{mm}$ 的转镜,此时二者速度比可达 $20/1$ 。

在我们的光镊系统中,采用了二维马达转镜系统来进行光阱位置的横向二维操纵,取得了较满意的实验效果。

参考文献:

- [1] Ishijima A, Kojima H, Tanaka H, Yanagida T. Title simultaneous measurement of individual ATPase and mechanical reactions by a single myosin molecule at work[J]. Optical Review, 1999, 6(1): 16- 23.
- [2] Simmons Robert M, Finer Jeffrey T, Chu Steven, Spudich James A. Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap[J]. Biophysical Journal. 1996, (4): 1813- 1822.
- [3] Yao X C, Li Z L, Cheng B Y, Han X H, Zhang D Z. Increasing transverse stability of optical tweezers by using dual-Gaussian beam profile[J]. Chinese Physics, 2000, 9(1): 65- 68.
- [4] Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. Biophys. J., 1992, 61(2): 569- 582.
- [5] Wright W H, Sonek G J, Berns M W. Radiation trapping forces on microspheres with optical tweezers[J]. Appl. Phys. Lett, 1993, 63(6): 715- 717.
- [6] Simpson N B, McGloin D, Dholakia K, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers with increased axial trapping efficiency[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(9): 1943- 1949.
- [7] Chiou A E, Wang W, Sonek G J, Hong J, Berns M W. Interferometric optical tweezers[J]. Optics Communications, 1997, 133(1- 6): 7- 10.
- [8] Smith S P, Bhalotra S R, Brody A L, Brown B L, Boyda E K, Prentiss M. Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories[J]. American Journal of Physics, 1990, 67(1): 26- 35.

Optical trap steering system

YAO Xin-cheng, LI Zhao-lin, GUO Hong-lian, CHENG Bing-ying, ZHANG Dao-zhong

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

Abstract: An optical tweezers, which can be used to manipulate biological sample in three dimensions, was incorporated into a LEICA DMIRBE inverted microscope with bottom port. During setting up this system, transverse position manipulating system of an optical trap was studied especially. Theoretical analysis and experimental results indicate that the transvers position of an optical trap can be changed by laterally moving or rotating a mirror. The mechanisms of optical trap steering systems by moving and rotating mirrors were explained in detail, respectively. In addition, comparing with moving mirror system the rotating mirror system is of benefit to increase the manipulating speed of an optical trap, simplify the mechanism of an optical tweezers, reduce its cost, and shorten the cycle of completing an optical tweezers.

Key words: optical trap steering system; optical tweezers; optical trap

作者简介: 姚新程(1974-), 男, 河南浚县人。分别于 1996、1998 年在哈尔滨工业大学航天电子与光电工程系获得工学学士、硕士学位。现在中科院物理所光物理实验室攻读博士学位, 师从于张道中研究员。主要从事光电精密仪器的设计与开发。