

文章编号: 0258-7025(2009)10-2751-06

旋转玻片法实现分时复用多光阱

吴建光^{1,2} 任煜轩² 王自强² 周程² 李银妹^{1,2,3}

(¹ 合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026; ² 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

³ 安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 利用倾斜放置于光镊光路中的旋转玻片对激光束进行斩波可以实现分时复用多光阱。详细讨论了光镊光路中引入玻片后, 光阱位置的变化随玻片位置、厚度以及倾斜角度等因素的变化关系。设计了可以加载不同厚度玻片的 8 孔转盘, 通过直流电机带动转盘旋转实现玻片对激光束的机械斩波, 进而获得分时复用多光阱。利用分时复用多光阱实现了两个、三个不同大小聚苯乙烯小球的稳定捕获, 通过改变玻片倾角可以改变光阱之间的距离, 实现对捕获小球距离的控制。给出了分时复用多光阱的初步结果, 从实验上证实了方法的可行性。

关键词 激光光学; 光镊; 多光阱; 分时复用; 旋转玻片

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093610.2751

Time-Sharing Multiple Optical Traps Using Rotating Glass Plate

Wu Jianguang^{1,2} Ren Yuxuan² Wang Ziqiang² Zhou Cheng² Li Yinmei^{1,2,3}

¹ Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, Hefei, Anhui 230026, China

² Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³ Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A novel method to realize time-sharing multiple optical traps is reported. Adding a tilted glass plate to the optical path, the laser propagation direction translates slightly. The dependence of trap position relying on the geometrical parameters of glass plate, such as plate site, thickness and tilted angle, are analyzed. A turnplate which is capable of loading as many as 8 glass plates of different thicknesses has been designed and fabricated. A direct current motor rotates the turnplate enabling mechanical chop of the laser beam, which forms the time-sharing multiple optical traps. Two and three polystyrene beads with different sizes are trapped by timing-sharing dual optical traps and tri-optical traps respectively. The distance between two adjacent traps varies when changing the tilted angle of the glass plate. Experimental results agree well with our theoretical ones discussed in the paper.

Key words laser optics; optical tweezers; multiple optical traps; time-sharing; rotating plate

1 引言

强会聚的激光在焦点附近形成三维势场, 可以稳定束缚电介质小球, 这就是单光束光镊^[1]。光镊可以捕获几纳米到几十微米的微粒^[2], 在很多领域已经有所应用^[3~5]。单束激光只形成一个光阱是光镊应用的一个限制因素, 很多研究中需要操控多个

粒子, 如研究胶体粒子相互作用^[3]、复杂流体的流变学性质^[6]、拉伸 DNA 丝^[4] 以及测量蛋白质间的相互作用^[7] 等, 这些研究都需要多光阱技术。

目前实现多光阱的方法有: 1) 采用多束不同波长的光镊光源; 2) 利用偏振分束器将一束激光分成偏振方向互相垂直的两束光, 形成双光阱; 3) 使用压

收稿日期: 2008-12-18; 收到修改稿日期: 2009-02-27

基金项目: 国家 863 计划(2007AA021811, 2007AA02809)和中国科学院知识创新工程(KJ CX2-YW-H-10)资助项目。

作者简介: 吴建光(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光镊技术及其在生物学中的应用等方面的研究。

E-mail: jgwu3@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李银妹(1953—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光镊技术及相关应用等方面的研究。

E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: 38565)

电转镜或声光调制器(AOM)操控单光束在不同位置切换实现时分多光阱;4)采用印制计算全息图的衍射光学元件将入射光变为需要的模式图样,形成复杂图样的多光阱。以上方法各有优缺点。多激光光源形成多光阱,需要制作满足多波长反射或透射的光学元件,对光学元件镀膜要求很高,增加了加工难度和成本;而采用偏振分束的方法,单光源只能产生两个光阱;利用压电转镜或 AOM 进行线扫描或多点扫描,可以在扫描轨迹上捕获多个微粒,很容易进行小球链排布;利用动态全息光镊可以实现各种复杂的操控,光阱数量也可以多达 400 个^[8],动态全息光镊可以操控粒子沿着任意设定的轨迹运动,实现各种复杂的操控^[8-11],在药物分选等领域有很大的应用价值。然而昂贵的价格使得 AOM 与动态全息等技术的发展受到一定的限制。此外,动态全息光镊稳定束缚多个粒子要求入射激光的功率很高。

本文介绍一种在普通单光镊装置上实现多光阱

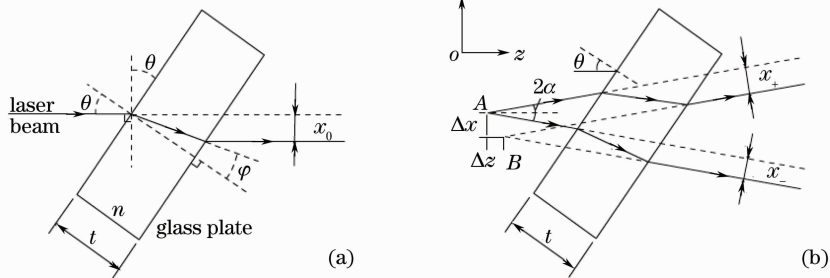


图 1 单束光线(a)和微发散光线束(b)经过平板玻璃的传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing a single ray (a) and the tiny emanative beams (b) passing through a glass plate

考虑 $x-z$ 平面内 A 点发出的两条光线,如图 1(b) 所示,它们与 z 轴夹角分别为 $\pm\alpha$ ($\alpha \ll 1$),入射到倾斜角为 θ 的玻璃片上(玻璃片表面法线在 $x-z$ 面内),则入射角分别为 $\theta \pm \alpha$,经过玻璃片后两条光线都发生平移,设平移量分别为 x_{\pm} 。当 $\alpha \ll \theta$ 时,一级近似下

的新方法。利用光经过一定厚度的倾斜玻片产生微小偏移来实现光阱位置的变化。将不同厚度的玻片放置于转盘中并倾斜安置在光镊光路的合适位置,当转盘旋转时即可实现多光阱。旋转玻片实现多光阱的方法新颖巧妙,与转镜或 AOM 实现分时复用技术相比,装置更加简单,成本更加低廉,很容易推广应用。

2 原理与设计

光线斜入射到平板玻片上,经过两次折射,出射光线会发生一定平移,如图 1(a) 所示。出射光线相对于入射光线的平移量 x_0 与入射角度 θ ,玻片厚度 t 以及玻璃折射率 n 间满足关系

$$x_0 = t \left(\sin \theta - \frac{\sin \theta \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right), \quad (1)$$

由(1)式可知,光线平移量 x_0 与 t, θ, n 都呈单调递增关系。

有 $x_{\pm} = x_0 \pm \alpha dx/d\theta$, x_0 为发散角为 0° 的光线经过玻片后在 x 方向的平移量。由图 1(b) 可知,两条微发散光线斜入射玻片后都发生平移,但出射光线反向延长线的交点 B 与 A 点不重合,交点 B 相对于 A 在 x, z 方向上都有偏移,分别为

$$\Delta x = \frac{x_+ + x_-}{2 \cos \alpha} \approx x_0 = t \left(\sin \theta - \frac{\sin \theta \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right), \quad (2)$$

$$\Delta z = \frac{x_+ - x_-}{2 \sin \alpha} \approx \frac{\partial x_0}{\partial \theta} = t \left[\cos \theta - \frac{\cos 2\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} - \frac{\sin^2 2\theta}{4 \sqrt{(n^2 - \sin^2 \theta)^3}} \right]. \quad (3)$$

由于 $\alpha \ll \theta$,一级近似下,偏移量与发散角 α 无关。由此可知从 A 点出发的发散角在 $\pm\alpha$ 范围内的所有光线经平板平移后均反向会聚于 B 点。当入射光线不在 $x-z$ 平面内时,需要考虑光线在 y 方向的发散角所造成的影响,经分析可知, y 方向发散的光经玻片

后,出射光线反向延长线同样会聚于 B 点。根据光路可逆原理,对于微会聚的光束照射到倾斜玻片上,也会造成会聚点的偏移,且偏移量与会聚角度没有关系,大小仍由(2)式,(3)式决定。

由显微镜光路可知,对于放大倍率为 γ 的物镜,

共轭点处的物横向和纵向偏移 $\Delta x, \Delta z$, 对应物镜焦平面上的像横向和纵向分别偏移 $\delta x, \delta z$, 它们的关系为

$$\delta x = \Delta x / \gamma, \tag{4}$$

$$\delta z = \Delta z / \gamma^2. \tag{5}$$

于是, 在共轭点后方放置倾斜玻片, 使入射光束发生横向及轴向偏移, 可造成物镜焦平面上光斑的偏移。根据这个思想可以实现光阱位置的改变。

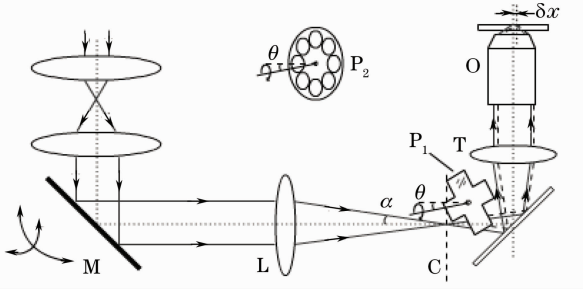


图 2 分时复用多光阱原理示意图

(实线: 没有玻片; 虚线: 光线经过玻片发生偏移)

Fig. 2 Schematic of time-sharing multiple optical traps (solid line: without plate; dash line: with tilted plate)

单光镊光路如图 2 所示, 平行光经过阱透镜 L 聚焦在显微镜共轭成像面 C 处, 然后以微发散的光束耦合进入显微镜, 通过辅助透镜 T ($f = 150 \text{ mm}$) 后以平行光进入物镜 O 中。在光镊设计中, 要求物镜后瞳的光束直径 d 为 $3 \sim 5 \text{ mm}$ ^[12], 由此可知 C 点前后光束的发散角 2α 约为 0.03 rad , 属于微发散光束。在显微镜共轭成像面后方 (也可以在前方, 但要在 L 之后) 放置倾斜玻片, 如图 2 中 P_1 , 玻片表面法线方向与光束传播方向保持夹角 θ , 则光束通过玻片会产生微小偏移, 造成光镊阱位发生横向变化。当玻片绕与表面垂直的轴旋转时, 以

一定的频率对激光进行斩波, 可以实现光镊阱位的横向跳动。当斩波频率大于一定值时, 跳动的两个光阱都可以稳定俘获粒子, 此时单光镊变成了分时复用的双光镊。将图 2 中 P_1 换为转盘 P_2 , 并在转盘内安置不同厚度的玻片, 转盘转动时可产生多个光阱。

3 实验结果

实验采用典型的光镊设备^[13]: 包括倒置显微镜 (Olympus IX-70, $100\times$ 油浸物镜 $d_{NA} = 1.3, 1.5\times$ 辅助成像透镜) 和激光器 (Spectra-Physics, CW, $\lambda = 780 \text{ nm}$), 样品为分散于水中的直径为 $1 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯小球 (Duke Scientific Corporation, USA)。设计了如图 2 所示的 8 孔转盘, 通光圆孔直径为 10 mm 。所用直流电机的额定电压为 24 V , 转速最高可达 5000 r/min , 通过电机带动转盘绕中心轴旋转实现对激光束的斩波, 加载不同厚度的玻片后, 可以实现多光阱。改变转盘转轴方向, 可以改变阱位间距。实验所用玻片材料为 K9 玻璃, 折射率 $n = 1.51$, 玻片直径为 12 mm 。

3.1 玻片对横向阱位的控制

在光镊光路中插入玻片后, 通过改变玻片的厚度和倾斜角度可以实现对光阱横向位置的控制。

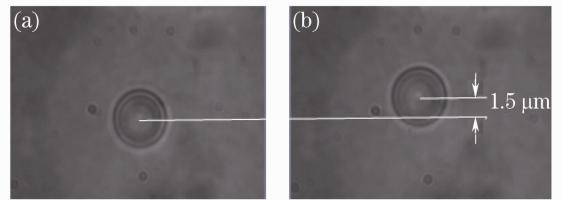


图 3 放置倾斜玻片后阱位发生变化 ($t = 2 \text{ mm}, \theta = 20^\circ$)

Fig. 3 Dependence of trap position on the presence of tilted plate ($t = 2 \text{ mm}, \theta = 20^\circ$)

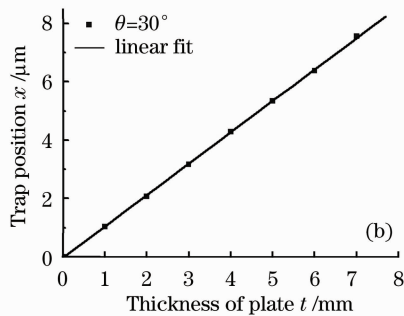
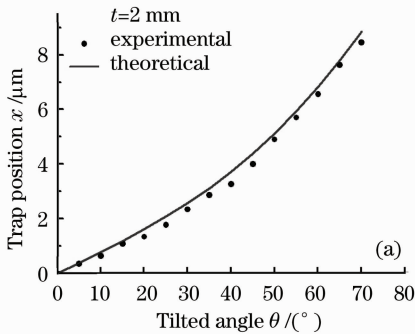


图 4 阱位横向偏移量随玻片倾角 θ (a) 和厚度 t (b) 的变化关系 ($\gamma = 150, n = 1.51$)

Fig. 4 Transverse excursion of trap position versus θ (a) and t (b) ($\gamma = 150, n = 1.51$)

将厚度为 2 mm 的玻片放置于显微镜共轭点处, 倾角为 20° 时, 光阱横向偏移 $1.5 \mu\text{m}$, 如图 3 所

示。玻片倾角不同时, 光阱阱位偏移也不同, 如图 4(a) 所示。阱位偏移量随倾角增大而增大, 图中实

线为根据式(1)计算的理论结果,点为实验测量数据,实验与理论符合很好。通过改变玻片厚度也可以实现阱位控制,图4(b)为玻片倾角 30° 时光阱偏移量随玻片厚度的线性变化关系。

3.2 旋转玻片实现多光阱

将两块厚度4 mm的玻片置于转盘中心对称的两圆孔内,旋转转盘可以实现双光阱。当玻片与入射光夹角 θ 为 25° 时,两光阱相距 $3.6\ \mu\text{m}$ 。利用此双光阱同时捕获了两个 $1\ \mu\text{m}$ 小球,如图5(a),也可以同时捕获一个 $3\ \mu\text{m}$ 小球和一个 $1\ \mu\text{m}$ 小球,如图5(b)。改变夹角 θ 为 40° 时,两光阱间距 $6\ \mu\text{m}$,同时捕获了两个 $3\ \mu\text{m}$ 小球,如图5(c)。实验中,电机转动频率在 $25\sim 75\ \text{Hz}$ 之间改变,即光阱切换频率为 $50\sim 150\ \text{Hz}$,两个光阱都能稳定捕获小球。

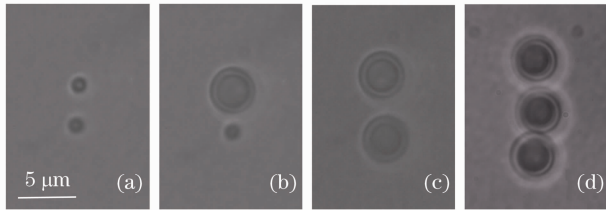


图5 分时复用光阱同时捕获两个直径为 $1\ \mu\text{m}$ (a),直径 $3\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ (b),两个直径 $3\ \mu\text{m}$ (c),三个直径 $3\ \mu\text{m}$ (d)的聚苯乙烯小球

Fig. 5 Two polystyrene beads with diameter $1\ \mu\text{m}$ (a), diameter $3\ \mu\text{m}$ and $1\ \mu\text{m}$ (b), diameter $3\ \mu\text{m}$ and (c), three beads with diameter $3\ \mu\text{m}$ (d) are trapped in the time-sharing multiple optical traps

取2 mm和4 mm的玻片各两块,间隔放入转盘中,电机转动频率大于 $25\ \text{Hz}$ 时实现了三光阱。利用产生的三光阱同时捕获了三个 $3\ \mu\text{m}$ 小球,如图5(d)。

4 玻片的实验参数讨论

4.1 玻片位置

在图2所示光路中,将倾斜玻片放置在阱位透镜L和显微镜之间任何一点,都可以实现光阱横向位置的变化。若将玻片放置在透镜L前面的平行光光路中,光束经过玻片将发生微小平移,经过物镜仍会聚于物镜焦点,但焦点后方的光束不再关于物镜光轴对称,光束强度中心偏离光轴。事实上,由于被捕获粒子的中心并不在物镜焦点处,而是处于焦点之外大约一个粒子半径处的光束强度中心^[14],所以光束中心的离轴会造成光阱横向位置变化。下面将详细讨论玻片放在平行光路中对阱位变化的影响。

设沿 z 方向传播的平行光经过厚度 t ,倾斜角度 θ 的玻片后偏移 Δx ,如图6所示。光束中心光线3经过阱位透镜L后与 z 轴夹角为 φ ,经过物镜后出射光线 $3'$ 与 z 轴夹角为 β 。图中 F 为物镜焦点即激光会聚点, A 和 B 分别为光阱变化前后被捕获小球的球心,易知 A 点在物镜光轴上,到 F 的距离等于小球半径 R ,而 B 点位于光线 $3'$ 上,到 F 距离也是 R 。设物镜放大倍率为 γ ,阱位横向偏移量设为 $\delta x'$ 。根据图6中几何关系有

$$\varphi \approx \Delta x/f, \beta \approx \gamma\varphi, \delta x' \approx R\beta, \quad (6)$$

于是有

$$\delta x' \approx \Delta x\gamma R/f, \quad (7)$$

取 $t=1\ \text{mm}$, $\theta=30^\circ$, $n=1.51$, $\gamma=100$, $R=1.5\ \mu\text{m}$, $f=350\ \text{mm}$,代入(7)式可得 $\delta x'=75\ \text{nm}$ 。若将同样的玻片以相同倾角放置于显微镜共轭点处,阱位偏移 $\delta x=\Delta x/\gamma=1.8\ \mu\text{m}$ 。由此可见,倾斜玻片应当放在阱位透镜L后方的光路中,才能产生更大的横向阱位偏移。

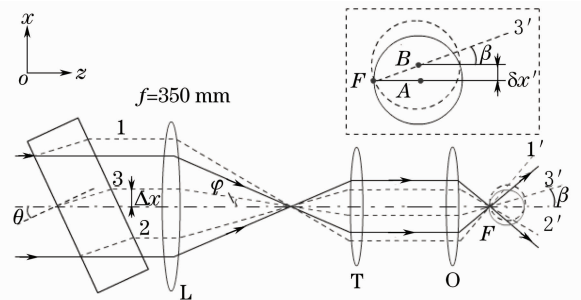


图6 玻片在平行光光路中对阱位的影响

Fig. 6 Schematic diagram showing tilted glass plate in the collimated beam slightly influences the trap

另外,旋转玻片对光束切割会造成光阱捕获粒子不稳定,切割时间与捕获时间之比越小,捕获越稳定,因而玻片最佳位置为光束直径最小处,即阱位透镜的焦点位置。

4.2 玻片厚度

实验中,根据光阱阱位偏离距离的需要来选择玻片的厚度。由(2)式易知,玻片厚度越大,造成的阱位偏移量也越大。取玻片折射率 $n=1.51$,厚度 $t=1\ \text{mm}$,倾斜角度 $\theta=45^\circ$,由(2)式得 $\Delta x=0.3\ \text{mm}$ 。当物镜放大倍率 $\gamma=100$ 时,光阱阱位横向偏移 δx 为 $3.1\ \mu\text{m}$ 。若需要增大阱位扫描范围,则根据需要增加玻片厚度。

由于玻片的引入,光阱在轴向也会发生偏移。由(5)式知,轴向偏移量与物镜放大倍率 γ 的平方成反比,可见玻片对阱位轴向位置影响相对比较小。

但当玻片厚度增加时,由于轴向阱位改变,与未加玻片时相比粒子成像将变模糊。在形成多光阱时,不同光阱中的粒子成像清晰度差别较大,将不利于后续数据处理。由(3)式, $\Delta z/t(\theta=45^\circ)\approx 0.6$, 则玻片厚度 $t = \Delta z/0.6 = \delta z\gamma^2/0.6$ 。取 $\gamma = 100$, 若要求 $\delta z < 1 \mu\text{m}$, 则玻片厚度 $t < 17 \text{ mm}$ 。事实上, 17 mm厚的玻片可以产生阱位横向偏移 $51 \mu\text{m}$, 假设产生多光阱时, 光阱间距 $4 \mu\text{m}$, 则可以形成多达 12 个光阱。由此可见, 采用倾斜玻片法实现多达 12 个光阱时, 由于不同厚度的玻片引起的轴向阱位变化可以忽略。

4.3 玻片倾角

光束通过倾斜玻片(放置于共轭点处)后发生偏移, 导致光阱横向和轴向位置都发生变化。而光阱轴向位置的改变会造成被捕获粒子成像发生变化, 所以设计中应当设法减小阱位轴向变化的影响, 即降低 $\delta z/\delta x$ 的值。由(4), (5)式得

$$\frac{\delta z}{\delta x} = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta z(\theta)}{\Delta x(\theta)}, \quad (8)$$

由(8)式可知, 物镜倍率越高, 轴向影响越小。当物镜选定后, $\delta z/\delta x$ 的值由玻片倾斜角度 θ 决定。 Δx , Δz 和 $\Delta z/\Delta x$ 随 θ 的变化关系如图 7 所示, $\Delta z/\Delta x$ 随 θ 单调递减, 也就是说, 相对于阱位的横向变化来说, 玻片倾斜角越大, 轴向变化越小。

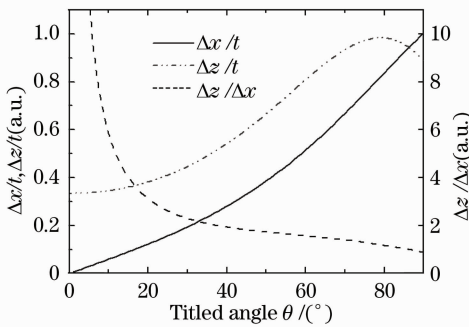


图 7 Δx , Δz 和 $\Delta z/\Delta x$ 与 θ 的关系 ($n=1.51$)

Fig. 7 Δx , Δz , and $\Delta z/\Delta x$ versus θ ($n=1.51$)

但玻片倾斜角度并非越大越好, 根据菲涅耳反射折射公式可知, 入射角 θ 较大时 ($> 60^\circ$), 玻片表面反射率急剧增大, 将造成激光功率不同程度的浪费。斜入射时, 不同偏振态的光反射率不同, θ 小于 30° 时, s 光(偏振方向与入射面垂直)和 p 光(偏振方向在入射面内)反射率都比较小, 大于 30° 且小于 θ_B 时, s 光反射率增大, 而 p 光反射率降低。所以要降低玻片反射率的影响, 玻片倾斜方向要选择让激光以 p 光接近 θ_B 入射。考虑到阱位改变大小和激光功率利用率, 玻片倾斜角度可以在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 范围内改

变, 如果入射光中 s 分量更多, 则玻片倾斜角度应该小于 50° 。

4.4 玻片转速

当光阱距离小于粒子直径时, 相邻光阱无法同时捕获两个粒子。当光阱捕获一个粒子后, 粒子会受到两个光阱的作用。如果玻片转速很低, 即光阱位置切换很慢, 那么粒子将跟随光阱的切换而运动。随着玻片转速增大, 当光阱位置切换后, 如果粒子还未到达光阱中心, 光阱已经切换到原来位置, 粒子的运动将会落后于光阱的切换, 且粒子振荡幅度小于光阱间距。当光阱切换频率足够高时, 粒子将稳定在两光阱中间的平衡位置。

如果光阱距离大于粒子直径, 那么相邻光阱都可以稳定捕获粒子。如果玻片转速过低, 在光阱切换过程中, 原先光阱中的小球由于布朗运动将可能离开捕获位置, 所以如果需要光阱可以稳定捕获粒子, 玻片转速不能过低, 即有一个临界转速。而对于不同大小的粒子, 由于其布朗运动幅度不同, 临界转速也将不同。另外, 由于此多光阱设计依靠直流电机带动转盘转动, 如果电机转速过高, 会产生较大的振动, 影响多光阱的稳定捕获。实验中发现, 当电机转速小于 4200 r/min (70 Hz) 时, 产生的振动可以忽略。

以上讨论了玻片位置、厚度、倾斜角度以及转动速度等因素对光阱位置控制的影响, 发现玻片放置在阱位透镜后面比前面可以实现更大的光阱位置改变; 而需要不同大小的阱位变化, 可以通过选择玻片的厚度和倾斜角来实现; 为了降低玻片表面反射而造成的激光功率损失, 需要选择合适的入射光偏振方向以及合适的玻片倾斜角度; 同时, 应该选择合适的电机转速, 使多光阱可以稳定捕获粒子, 同时避免电机高速转动带来的振动影响。

5 结 论

在单光镊装置中的显微镜共轭成像面处放置平板玻片可以实现光镊阱位横向与轴向的改变, 通过改变玻片的厚度和倾斜角度, 可以实现光阱位置的控制。快速改变玻片厚度则可以实现阱位的快速切换。在旋转转盘内放置不同厚度玻片, 可以将单光阱变为分时复用多光阱。利用设计的装置, 进行了两个小球和三个小球的稳定捕获, 实现了双光阱和三光阱。进一步, 放置多种厚度的玻片, 将能够获得更多的光阱位。旋转玻片法实现分时复用多光阱方法简单, 成本低廉, 实施易行, 可以在胶体粒子相互

作用的测量、小球链的排布以及细胞拉伸等方面得到应用。

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 Zhou Jinhua, Qu Lianjie, Yao Kun *et al.*. Observing nanometre scale particles with light scattering for manipulation using optical tweezers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(1): 329~331
- 3 Ren Hongliang, Zhuang Lihui, Li Yinmei. Measurement of interaction potential between colloidal particles using dual optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 151~155
任洪亮, 庄礼辉, 李银妹. 双光镊测量胶体微粒间相互作用势 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 151~155
- 4 Maarten C. Noom, Remus T. Dame, Gijs J. L. Wllite Bacterial chromatin organization by H-NS protein unravelled using dual DNA manipulation[J]. *Nature*, 2006, **444**(7117): 387~390
- 5 Peter J. Pauzauski, Aleksandra Radenovic, E. Trepagnier *et al.*. Optical trapping and integration of semiconductor nanowire assemblies in water[J]. *Nature Materials*, 2006, **5**: 97~101
- 6 Eric M. Furst. Applications of laser tweezers in complex fluid rheology[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2005, **10**(1-2): 79~86
- 7 Jeffrey T. Finer, Robert M. Simmons, James A. Spudich. Single myosin molecule mechanics; piconewton forces and nanometre steps[J]. *Nature*, 1994, **368**: 113~119
- 8 J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**(1-6): 169~175
- 9 A. Jesacher, C. Maurer, S. Fürhapter *et al.*. Optical tweezers of programmable shape with transverse scattering forces[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 2207~2212
- 10 Ren Yuxuan, Zhou Jinhua, Wu Jianguang *et al.*. Holographic tweezers—the most vigorous member in optical tweezers' family[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 35~41
任煜轩, 周金华, 吴建光等. 全息光镊——光镊家族中极具活力的成员[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 35~41
- 11 D. G. Grier. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**: 810~816
- 12 B Meng, J. Zhou, M. Zhong *et al.*. Improvement of transverse trapping efficiency of optical tweezers[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(6): 2300~2302
- 13 B. Meng, J. Wu, Y. Li *et al.*. Aging process of the bond between colloidal particles measured using laser tweezers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Eng. Aspects*, 2008, **322**: 253~255
- 14 Li Yinmei, Lou Liren, Yao Yuan *et al.*. The observation and adjustment of the position of a laser trap [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(12): 1083~1086
李银妹, 楼立人, 姚媛等. 光阱阱位的观察与调节[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(12): 1083~1086