

# 胶体微粒间相互作用势测量系统

任洪亮<sup>1</sup> 周金华<sup>2</sup> 丁攀峰<sup>1</sup> 李银妹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华侨大学信息学院, 福建 厦门 361021  
<sup>2</sup>中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026

**摘要** 设计出以可编程控制器、伺服电机放大器、伺服电机和编码器为主要部件的可编程机械斩光器,并将其与多光镊系统相耦合,构建了胶体微粒间相互作用势测量系统。利用该系统测量聚苯乙烯球悬浮液中两个小球之间的静电相互作用势,其结果与胶体稳定理论符合,验证了系统的可靠性。该斩光器具有良好的易用性、兼容性和可移植性。并且该系统能在可控的物理化学条件下从粒子层次直接测量胶体粒子间不同类型的相互作用势,为深入探究胶体的微观机制提供了一种有效的测量手段和技术平台。

**关键词** 测量;相互作用势;闪烁光镊;同步斩光器

**中图分类号** TN249; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1208002

## Measurement System of Interaction Potential between Colloidal Particles

Ren Hongliang<sup>1</sup> Zhou Jinhua<sup>2</sup> Ding Panfeng<sup>1</sup> Li Yinmei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China  
<sup>2</sup>Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** A mechanical chopper is designed based on the programmable logic controller, servo motor amplifier, servo motor and encoder. The interaction potential measurement system is constructed by the mechanical chopper and dual optical tweezers. The characteristic of the system such as the design of the chopper, the switching time of the blinking optical tweezers, the tuning range, the origin position return feature, the compatibility and the usability of the system are discussed. The system is used to measure the interaction potential of a pair polystyrene spheres. The result is consistent with the Darjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory, which demonstrates the reliability of the apparatus. In addition, the apparatus provides an effective technique for measuring the interaction potential between two micro colloidal particles.

**Key words** measurement; interaction potential; blinking optical tweezers; synchronized chopper

**OCIS codes** 120.4570; 120.4640; 140.7010; 220.4830

## 1 引 言

胶体系统在化学、生物、医药、土壤科学、纺织、石油工业等各种生产领域都普遍存在,胶体颗粒之间的相互作用对生产过程、生产工艺和产品质量等都有重要影响。胶体的聚集、絮凝、相分离、应力松弛等各种动力学现象归根结底都受到胶体颗粒之间相互作用的影响,因而测量胶体粒子间的相互作用

势具有重要意义。对憎液胶体相互作用的研究最有成就的是 1941 年由 Darjaguin 和 Landau 以及 1948 年 Verwey 和 Overbeek 分别提出的带电胶体粒子稳定的 DLVO 理论<sup>[1]</sup>。但由于胶体颗粒的线度处于纳米到微米层次,很难对这些微粒个体的运动行为进行直接观测和实验研究。另一方面,胶体粒子间的相互作用势非常微小,很容易受到外界干扰,因

**收稿日期**: 2011-07-21; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(21073174)、中国科学院知识创新工程(KSCX2-YW-H-10)、厦门市科技计划项目(3502Z20113017)、花桥大学基本科研业务费专项基金(JB-ZR1146, JB-JC1010)和华侨大学科研启动费(09BS614)资助课题。

**作者简介**: 任洪亮(1980—),男,博士,讲师,主要从事光镊技术在胶体体系和生物体系中的应用等方面的研究。

E-mail: renhongliang@ustc.edu

此直接测量胶体粒子间的相互作用势是一个复杂而困难的问题,长期以来对分散体系的实验研究大多是从宏观上来进行的<sup>[1]</sup>。在传统的实验方法中,一般都利用胶体的电动现象和胶体粒子的光散射对胶体性质进行研究,观测的是大量粒子的群体行为,因此很难为微观理论提供充分的实验依据。直到1986年,Ashkin等<sup>[2]</sup>发明了具有显微操控和观测功能的光镊,才使得研究分散体系中单个粒子的微观行为成为可能。光镊<sup>[2,3]</sup>是利用光的力学效应来操控微小粒子的工具,是一种非接触操控微粒的方式,对被捕获的粒子影响很小,即可以在保持被捕获粒子性质不变的情况下对粒子之间的相互作用和动力学过程进行研究。因此,利用光镊能实现在可控的物理化学条件下直接研究胶体的各种微观性质。

胶体粒子是一种布朗粒子,它们在分散介质(液体)中不停地做布朗运动,因此有可能从粒子的运动中得出胶体粒子间的相互作用势。一般利用光镊研究胶体微粒的相互作用,主要通过光镊操控被研究的粒子放置在合适的位置,追踪粒子在特定位置以及在一定时间间隔内的布朗运动(光镊对微粒无作用力),并对粒子轨迹进行数字图像处理,由福克-普朗克方程可以得出胶体微粒间的相互作用势<sup>[4]</sup>。1994年Crocker等<sup>[5]</sup>报道了用光镊首次成功测量了胶体粒子间的相互作用势,他们先使用固定的双光镊捕获一对胶体粒子,然后保持光镊持续关闭,连续追踪两个粒子的运动过程。由于胶体粒子一直存在三维布朗运动,一方面粒子很容易逃离设备的录像范围,导致实验无法持续进行;另一方面在一定时间后,粒子的纵向位移过大,远远超出显微镜的景深,导致成像模糊,从而增加图像处理难度,甚至无法处理。为了提高实验成功率和实验效率,本文研制出以可编程控制器和伺服电机为基础、具有同步功能的可编程斩光器。该斩光器可以根据需要遮挡聚焦光束,从而实现光镊的开和关两种状态之间的转换,定位粒子时打开光镊,测量微粒的布朗运动时关闭光镊。斩光器与多光镊系统相耦合,构建了一套胶体微粒间相互作用势测量系统。

## 2 测量原理和系统设计

考察水中两个聚苯乙烯粒子存在相互作用情况下的动力学过程,即从粒子间运动过程的统计分析推断粒子间的相互作用。聚苯乙烯微粒的比重为1.05,因此可以忽略水中聚苯乙烯微粒所受重力和浮力的合力,并认为聚苯乙烯微粒在二粒子之间相

互作用势 $U(r)$ 中作布朗运动。场 $U(r)$ 是只与球心间距 $r$ 有关的定态有心场,因此该两个微粒的布朗运动可分为整体布朗运动和微粒间相对布朗运动,相对布朗运动相当于单个微粒在另一个静止微粒产生的场 $U(r)$ 作用下的布朗运动。这是一个马尔可夫过程<sup>[4]</sup>,场 $U(r)$ 决定了表征粒子相对布朗运动的位置转移概率 $P$ 。转移概率和粒子的空间概率密度分布 $\rho(r)$ 满足关系 $\rho_i = \sum_j^N P_{ij}\rho_j$ 。这里将测量区间分割为 $N$ 个小区, $\rho_i$ 和 $\rho_j$ 分别为粒子在第 $i$ 和第 $j$ 个空间区域内出现的几率, $P_{ij}$ 表示粒子从第 $j$ 个空间区域转移到第 $i$ 个空间区域的转移概率,以 $P_{ij}$ 为矩阵元的整个矩阵就是转移概率矩阵。粒子在不同位置间转移最终达到概率密度 $\rho$ 的平衡分布。平衡时 $\rho$ 满足玻尔兹曼分布<sup>[4]</sup>, $\rho = C_{\text{const}} \exp\left[-\frac{U(r)}{K_B T}\right]$ ,其中 $K_B$ 是玻尔兹曼常数, $T$ 是绝对温度, $C_{\text{const}}$ 是归一化常数。整个测量过程就是直接测量转移概率矩阵 $\mathbf{P}$ ,求得平衡概率密度分布 $\rho$ ,最终获得粒子间的相互作用势 $U(r)$ 。

根据上述原理,利用光镊具有操控微粒和测量微粒运动轨迹的功能,可以设计双闪烁光镊来测量粒子间相互作用势 $U(r)$ 。实验过程为先开启双光镊,分别捕获一个聚苯乙烯微粒,并把这两个微粒移动到设定的初始距离 $r_j$ 。然后同时关闭这两个光镊,经过设定的时间后,测量粒子从第 $j$ 个空间区域转移到第 $i$ 个空间区域的转移概率 $P_{ij}$ 。大量重复上述过程,进行统计分析,最终测量得到粒子间的相互作用势 $U(r)$ 。

测量系统需要使用两个光镊分别控制一个聚苯乙烯小球,632.8 nm的He-Ne激光器和810 nm的半导体激光器(LD)对聚苯乙烯小球具有很高的捕获效率<sup>[6]</sup>,适合作为该测量系统的捕获光源,同时避免了由于使用同一相干光源容易出现的干涉现象,减少了实验干扰。

胶体微粒间相互作用势测量系统主要包括双光镊、一台倒置生物显微镜、一套CCD录像设备、一个机械斩光器以及一台计算机,其原理图如图1所示。

图1中虚线框代表显微镜(IX70, Olympus, Japan)。LD是波长为810 nm的半导体激光器,正透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 构成的扩束系统使得扩束后的激光束能够充满物镜后瞳,提高光镊对粒子的捕获力。在距显微镜进光通道口一定距离处存在物平面的共轭面, $L_3$ 将激光束会聚到该平面上,即可保证激光束会

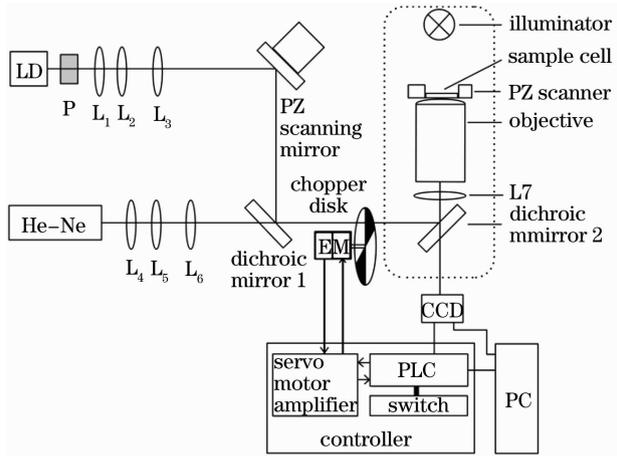


图1 胶体微粒间相互作用势测量系统的原理图

Fig. 1 Scheme diagram of measurement system of interaction potentials between colloidal particles

聚在物平面,使半导体光镊的阱位在显微镜的物平面上<sup>[7]</sup>。He-Ne 激光器 (35 mW, Polarized, Coherent, USA)用于构建氦氛光镊。 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$  和  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  所起的作用完全一致。半导体光镊光路比氦氛光镊光路多了整形棱镜 (P) 和压电转镜 (S-330. 30, PI, German),该整形棱镜用于将半导体激光器发射的椭圆光斑整形成圆光斑,计算机控制压电转镜偏转,实现半导体光镊阱位在水平面上的二维扫描<sup>[8]</sup>,从而改变两个光镊的相对距离,半导体光镊阱位有效扫描范围约为半径  $10 \mu\text{m}$  的圆形区域。此两路光束在显微镜中经过辅助透镜  $L_7$ ,被放大倍率为 100 倍的油浸物镜 (数值孔径  $d_{\text{NA}} = 1.35$ , Olympus, Japan) 会聚到样品池中,形成两个独立光镊。密封的样品池置于压电扫描平台 (P-517. 3CL, PI, German) 上。两个光镊在纵向 (Z 方向,即垂直于观察平面的方向) 的捕获和操作范围是从样品池底面到底面向上约  $40 \mu\text{m}$  的高度范围内,这个操作可以通过调节显微镜调焦手轮和压电平台的 Z 方向运动来实现。实验中通过 CCD (CoolSnap-Pro cf, Roper Scientific, USA) 记录不同时刻微粒的图像,并对图像进行相关分析得到两个粒子球心间的相对距离。

本测量系统中的一个关键部件是可编程的同步斩光器。该同步斩光器主要由控制器 (controller)、伺服电机 (M)、编码器 (E) 和斩光盘 (chopper disk) 组成。斩光器控制器主要由可编程控制器 (PLC)、伺服电机放大器 (servo motor amplifier) 和控制开关 (switch) 组成。可编程控制器可以与计算机 (PC) 连接,利用计算机编写程序并录入到可编程控制器。CCD 拍照时发出 TTL 同步信号触发编程控制器根据预设程序发出控制脉冲信号到伺服电机放

大器,伺服电机放大器驱动伺服电机转动,并带动斩光盘转动,斩光盘用来实现光镊的开和关两个状态之间的转换,定位粒子时打开光镊,测量微粒的布朗运动时关闭光镊。



图2 斩光盘

Fig. 2 Chopper disk

由于斩光盘工作时一直旋转,为保持转动惯量的平衡,斩光盘为非对称结构,如图 2 所示。图中红点表示激光光斑 (彩图见电子版),箭头表示旋转方向。斩光盘置于双色反射镜 1 和显微镜之间与显微镜物平面相共轭的平面上,那里正是激光束腰所在位置。其开关时序图如图 3 所示,当斩光盘角速度最大时对光斑束腰进行切割,这样,光镊的开关切换时间最短。斩光盘切割光斑的角速度最高可达到  $3000 \text{ r/min}$ ,斩光盘直径在  $10 \text{ cm}$  左右,实际使用时光镊从全开启到全关闭所用典型时间,即光镊波形的下降沿时间小于  $0.2 \text{ ms}$ 。对单光镊关闭过程中布朗粒子扩散运动的方向性进行检测,实验数据表明单光镊关闭过程中布朗粒子扩散呈现出良好的各向同性,表明这样的光镊关闭速度是足够的,不会影响胶体粒子间相互作用势的测量。

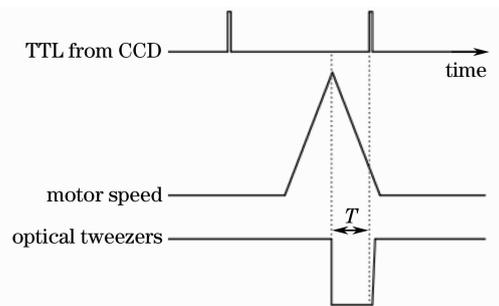


图3 CCD 录像与光镊开关时序图

Fig. 3 Sequence chart of CCD camera and optical tweezers

本系统工作时必须保证斩光器与 CCD 的精确同步运行。如图 3 所示,CCD 在拍摄图像的同时发出一个 TTL 脉冲信号,该 TTL 脉冲信号幅值为  $5 \text{ V}$ ,脉宽为 CCD 的曝光时间,一般选为  $1 \text{ ms}$ 。该 TTL 脉冲的上升沿触发斩光器控制器后,斩光器控制器根据设定的程序驱动伺服电机,电机带动斩光

盘旋转,伺服电机末端配置的编码器实时地将电机轴转过的角度(也即斩光盘转过的角度)反馈到伺服电机放大器,伺服电机放大器对该角度信号和可编程控制器的输入信号进行对比,调整对电机的驱动信号,保证电机按可编程控制器的预设程序运行。其最终结果是按设定的时间顺序打开和关闭光镊,并控制光镊打开的持续时间和关闭的持续时间,保证 CCD 是在光镊完全关闭并经过设定的时间后采集下一个图像信息,并将这段时间定义为观测延迟时间  $\tau$ 。

### 3 测量结果及系统特点

利用本胶体微粒间相互作用势测量系统对静电稳定的胶体粒子聚苯乙烯小球间[直径  $(0.993 \pm 0.021) \mu\text{m}$ , Duke Scientific, 4009A, USA]相互作用势进行了测量,数据处理方法及结果见文献[9],测量结果如图 4<sup>[9]</sup>所示,其中  $a$  为小球半径,实验结果与 DLVO 理论符合较好,证明了该系统的可靠性。图中横坐标表示两个粒子间中心距离与小球半径之比,纵坐标表示粒子相互作用势,单位为  $K_B T$ 。实验中利用了转移概率  $P$  和粒子空间概率密度分布  $\rho(r)$

的关系  $\rho_i = \sum_j^N P_{ij} \rho_j$ , 然而实际上这是对粒子连续转移过程  $\rho(r) = \int P(r, \tau | r', 0) \rho(r') dr'$  的离散近似。

位置区间分得越细,  $N$  值越大, 离散过程越接近实际连续过程, 实验精度就越高。但是基于光镊明场照明和常规 CCD 的显微测量装置, 系统的空间分辨率受到限制(一般在数百纳米), 分区就无法太细, 这会引入较大的误差, 尤其是在势能变化很陡的区域。这是实验误差的主要来源。同样由于分辨率受限, 两个粒子的初始距离不能过小, 以免两个粒子的图像发生重叠, 影响粒子位置的测量。因此, 利用暗场照明和使用高分辨率的 CCD 是提高系统空间分

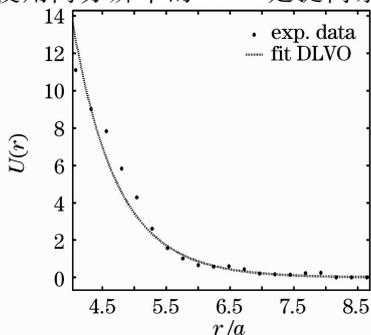


图 4 小球间的相互作用势

Fig. 4 Interaction potential between two particles

辨率、增加分区数量、减小测量误差的有效手段。

下面将具体讨论本测量系统,特别是其中关键装置斩光器的各项性能和特点。

1) 在系统中没有使用速度更快的电光晶体作为斩光器,是基于以下几点考虑。

目前测量胶体粒子之间的相互作用势能主要依赖于多光镊,其中又以双光镊系统为主。为避免双光镊之间产生干涉现象,一般利用同一光源偏振光束形成的双光镊,或者是利用不同波长光源形成的双光镊。无论是哪一种构成形式的双光镊,都不得使用两套电光晶体组成的两个斩光器系统分别对两个光源进行斩光。这会增加双光镊同步斩光过程中的时间误差,更增加了设备的成本、复杂性及维护难度,系统稳定性也相应下降。另外,在光镊光路中加入晶体,会增加光路的光程,准直调节也相对困难。如果光路调整不够完善,消光可能不会太好,光镊就无法完全关闭,影响实验测量。

现有的实验结果以及理论计算都表明,当小球的大小和形成光镊的激光束的束腰相近时,光镊的捕获效果最佳<sup>[10]</sup>。这样,针对不同大小尺度和折射率的样品体系,应该灵活地选择光源波长以达到最佳的捕获效应,最好是使用可调谐波长激光器。如果本系统的测量对象是生物大分子等生命体系,激光波长的选择就显得尤为重要。科研人员总是希望在充分利用光镊的非机械接触式操控的优点的同时能尽量避免由于生物组织对激光的吸收导致样品受到的损害。因为生物组织通常是各种分子的复合体,性质过于复杂,所以无法给出确定的吸收规律,但是人们通过大量实验归纳出很多经验法则<sup>[11]</sup>,例如在紫外光范围, DNA (260 nm 附近) 和蛋白质 (280~300 nm) 是主要的吸收体,生物体对红外光的吸收则是由水的吸收作用来决定。对比 Nd:YAG 激光与波长 700~1000 nm 的可调谐钛蓝宝石激光对生物粒子活性的影响,表明后者更适合作为光镊光源 (Berns 等<sup>[12]</sup>)。总之,即使光源波长发生变动,本机械斩光器也无需做任何改变仍然适用,这大大增加了系统的可移植性和易用性。电光晶体则需要根据特定波长精确调节半波电压,使用相对复杂。

2) 斩光器的斩光频率即光镊的开关频率为电机转速和斩光盘空间周期的乘积,本系统使用的电机速度在 0~3000 r/min 可调,同时可以根据需要设计不同占空比,因此本斩光器的斩光频率在数赫兹到数千赫兹的范围内可调。本斩光器系统使用了闭环系统,具有高斩光频率稳定性。使用的 CCD 连

续拍照时帧周期漂移不超过 0.2 ms, 这样 CCD 图像采集时间与光镊开关时间的同步精度优于 0.4 ms。

3) 本系统具有绝对位置编码器, 长时间运行无累计误差。使用人员可以把本次实验过程中机械斩光器的初始角度(位置)录入到斩光器控制器, 下次系统开机时, 斩光器会自动转到上次实验所在的角度, 即该系统具有原点记忆和回归功能。

4) 根据实验需要, 本系统可以接受 CCD 发出的 TTL 脉冲精确开关光镊, 也可以是本斩光器开关光镊实时输出信号去精确触发 CCD 拍照。因此本斩光器对不同类型的 CCD 等设备具有良好的兼容性和扩展性。

整个测量系统能根据预设程序自动运行, 包括光镊的开关、粒子运动图像的连续采集, 辅以自编的图像分析软件, 能方便地直接得到两个粒子间的相互作用势。根据光镊刚度及胶体粒子布朗运动的特性, 设定恰当的光镊开关时序, 实验效率很高, 一般可以在 2 h 内完成。

## 4 结 论

设计了一套基于可编程控制器、伺服电机放大器、伺服电机、编码器的机械斩光器, 把该斩光器耦合到双光镊光路中, 利用斩光器与 CCD 的同步功能, 从而建立一套测量胶体粒子间相互作用势的实验装置。对该测量装置特别是对系统的关键部件斩光器的特性做了详细的讨论, 并主要分析了斩光器选择方案、斩光器的原点记忆和回归功能、频率调谐范围及稳定性、精度、兼容性和扩展性。利用对聚苯乙烯球悬浮液中两个小球之间的静电相互作用势的实验研究验证了该系统的可靠性。该研究装置可测量胶体粒子间不同类型的相互作用势, 为深入研究决定分散体系宏观性质的微观机制提供了一种有效的测量手段和技术平台。

致谢 感谢中国科学技术大学楼立人教授在本文工

作中给予有益的讨论和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Paul C. Hiemenz. Principles of Colloid and Surface Chemistry [M]. Zhou Zukang, Ma Jiming Transl. Beijing: Beijing University Press, 1986. 504~510  
希姆恩斯. 胶体与表面化学原理[M]. 周祖康, 马季铭译. 北京: 北京大学出版社, 1986. 504~510
- 2 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
- 3 Sun Qing, Ren Yuxuan, Yao Kun *et al.*. Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109003  
孙 晴, 任煜轩, 姚 焜等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0109003
- 4 N. G. van Kampen. Stochastic Processes in Physics and Chemistry (Third Edition)[M]. North-Holland; Elsevier, 2007. 52~218
- 5 J. C. Crocker, D. G. Grier. Microscopic measurement of the pair interaction potential of charge-stabilized colloid[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(2): 352~355
- 6 M. J. Kendrick, D. H. McIntyre, O. Ostroverkhova. Wavelength dependence of optical tweezer trapping forces on dyed-doped polystyrene microspheres[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(11): 2189~2198
- 7 Zhou Cheng. Focusing properties of Gaussian beams through a telescope-lens compound system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1203~1207  
周 城. 高斯光束望远镜和薄透镜组合系统的聚焦特性[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(8): 1203~1207
- 8 Yao Xincheng, Li Zhaolin, Guo Honglian *et al.*. Optical trap steering system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(1): 55~58  
姚新程, 李兆霖, 郭红莲等. 光阱位置操纵系统的研究[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(1): 55~58
- 9 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
- 10 Robert M. Simmons, J. T. Finer, S. Chu *et al.*. Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap[J]. *Biophysical Journal*, 1996, **70**(4): 1813~1822
- 11 Karl Otto Greulich. Micromanipulation by Light in Biology and Medicine: the Laser Microbeam and Optical Tweezers [M]. Basel: Bostonn, 1999. 40~73
- 12 M. W. Berns, J. B. Aist, W. H. Wright *et al.*. Optical trapping in animal and fungal cells using a tunable near-infrared titanium-sapphire laser[J]. *Exp. Cell Res.*, 1992, **188**(2): 375~378

栏目编辑: 何卓铭