

文章编号: 0258-7025(2010)02-0398-06

背散光实时分辨光阱中的纳米粒子个数

钟敏成¹ 张文静^{2*} 周金华¹ 李银妹^{1,3} 田来科² 白晋涛²

¹ 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026
² 西北大学物理学系, 陕西 西安 710069
³ 合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 利用光镊捕获单个微小粒子, 在各个研究领域得到重要应用。光镊也能同时捕获两个或更多个粒子, 明确地知道光阱中粒子的个数, 是顺利进行研究的前提。根据光散射原理, 提出通过测量阱域内微小粒子的背散光强度来区分光阱中的粒子个数, 实验上成功地实现了对直径分别为 $1\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$, $0.2\ \mu\text{m}$, $100\ \text{nm}$ 和 $73\ \text{nm}$ 的被捕获于光阱中的粒子个数的分辨。对背散光光强随着粒子直径变化所反映的信息进行了分析, 讨论了光阱中多粒子的排列状态。通过背散光实时动态分辨光阱中的纳米粒子个数的实验方法, 对将光镊扩展到纳米尺度的应用提供了技术支持。

关键词 激光光学; 光镊; 背散光; 纳米粒子个数

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0398

Distinguishing the Number of Nanometer-Sized Particles in Single Optical Trap by Measuring the Back Scattering of Light

Zhong Mincheng¹ Zhang Wenjing² Zhou Jinhua¹ Li Yinmei^{1,3} Tian Laike² Bai Jintao²

¹ Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
² Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China
³ Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Optical tweezers have increasingly widespread application in a large variety of scientific disciplines because they can trap a micro-particle losslessly. They can also trap multiple particles in single optical trap due to the characteristic of the potential energy of the trap. How to distinguish the number of particles in single optical trap is the key work in the experiment. A novel method based on laser scattering method to distinguish the numbers of nanometer-particles in single trap was presented in this paper. The number of particles in single trap was distinguished by measuring the intensity of light backscattering with corresponding situation. The number of particles with diameters of $1\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$, $0.2\ \mu\text{m}$, $100\ \text{nm}$, $73\ \text{nm}$ was distinguished successfully, and the state of optical trap was discussed. This method may find the application of optical tweezers in nanometer dimension.

Key words laser optics; optical tweezers; light backscattering; number of nano-particles

1 引 言

光镊^[1]可以非机械接触式地捕获和操纵几十纳米到几十微米的微粒, 可以在不影响粒子本身性质和周围环境的情况下对粒子的性质及其与周围环境

的相互作用进行研究, 具备上述独特功能的光镊技术已被广泛应用于生物学^[2,3]、微流变学测量^[4,5]、胶体化学^[6,7]等研究领域, 同时也促进了光镊技术本身的发展^[8,9]。

光镊的特点是有选择地捕获目标粒子, 被捕获

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-05-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KJ CX2-YW-H-10)和国家 863 计划(2007AA021811, 2007AA021809)资助项目。

作者简介: 钟敏成(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光镊技术在分散体系的应用研究。E-mail: zmc@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其相关应用的研究。

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

* 通信联系人。E-mail: wjzhang@nwu.edu.cn

的粒子为一个、两个甚至更多,这在实际情况中有不同的应用。例如在功率谱法测光阱刚度的研究^[10]中,光镊捕获单个粒子,获得小球位移的功率谱,通过拟合得到光阱的刚度。在微观测量分散体系稳定性实验^[11]中,需要光阱能够捕获两个粒子,测量两个粒子的结合率,以了解分散体系的稳定性。因此明确光阱中的粒子个数,是光镊在微观层次开展实验研究的前提。

利用光镊有目的地捕获粒子的同时,由于光镊光场的势阱特点以及粒子因布朗运动也会随机陷入阱中,这种非目标粒子的介入严重干扰了实验。对于光阱中的微米粒子,可以通过显微观测来分辨,当粒子的直径为亚微米量级,即直径小于200 nm时,由于显微镜放大倍数和分辨率的限制,此时已无法通过显微镜清晰成像分辨被捕获粒子的个数,即使出现光镊捕获两个粒子时,也会被误认为是一个粒子。非目标粒子的介入给实验研究带来了困难和误差,因此,如何辨别光阱中捕获的粒子个数,便成为顺利进行实验研究的关键前提。

光阱中有若干个微米粒子时,它的功率谱图与光阱中只有一个粒子时的功率谱相似^[12],通过小球的成像可以区分它们。通过实时测量光阱中纳米粒子的拉曼光谱^[13]、双光子激发的荧光强度变化^[14]等方法,能够分辨光阱中的纳米粒子个数。如果光阱中捕获的是量子点,通过量子点的发光强度^[15]变化可以得到光阱中量子点的个数。

本文从光散射理论出发,使用四象限探测器(QD)采集被捕获的粒子的背散光强度,考虑光阱中捕获不同个数粒子时背散光强度是有区别的,因此可以根据散射光光强的变化规律去辨别光阱中是单个粒子还是多个粒子,即通过测量阱域背散光强度来分辨光阱内的粒子个数。

2 原 理

一束波长为 λ ,光强为 I_0 的光照射半径为 a 的小球时,如图1所示,小球中心处于坐标原点 O ,在 P 点探测到小球的散射光强^[16]为

$$I = \frac{c}{4\pi} KK^* FF^*, \quad (1)$$

式中 c 为光速, K 为常数(与散射体的性质无关), F 为光散射结构因子,表示为

$$F = V(\alpha_0 - \alpha_s)\Phi(U), \quad (2)$$

式中 V 为圆球的体积。圆球的散射函数 $\Phi(U)$ 为

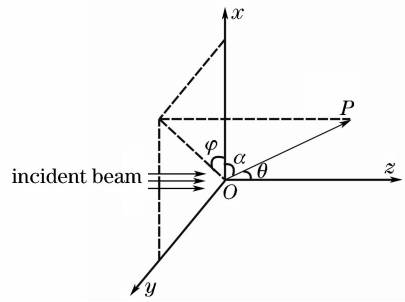


图1 微粒的散射模型

Fig. 1 Model of light scattering

$$\Phi(U) = \frac{3}{U^3}(\sin U - U \cos U), \quad (3)$$

$$U = 4\pi \frac{a}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

两个粒子体系中,总的散射光强是两粒子各自的散射加上一个附加项,后者依赖于两粒子间的相对位置,即

$$I = I_1 + I_2 + \frac{c}{2\pi} KK^* F_1 F_2^* \cos[k(\mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{s})], \quad (5)$$

式中 \mathbf{s} 为能流方向, \mathbf{R}_2 为两个粒子球心距离。(5)式可以推广到多粒子情况,总光强 I 为

$$I = \sum_{i=1}^N I_i + \frac{c}{2\pi} KK^* \sum \sum_{i \neq j} F_i F_j^* \cos[k(\mathbf{R}_{ij} \cdot \mathbf{s})]. \quad (6)$$

当光阱中只有一个粒子时,粒子对激光的散射是瑞利散射或米氏散射,粒子的背散光信号都不为零。根据(5)和(6)式,当光阱中的粒子个数产生变化时,其背散光的强度必然会改变,因此通过探测背散光强度的变化,可以知道光阱中粒子的个数。

3 实 验

3.1 实验设备及样品

实验设备采用如图2所示的光镊装置^[17]。光镊光源为 He-Ne 激光器(35 mW, Polarized, Coherent, USA),输出的激光波长为632.8 nm,输出的激光束经过扩束,由耦合光路耦合进入倒置显微镜(IX70, OLYMPUS, JAPAN),再由油浸物镜(100 \times , $d_{NA} = 1.35$, OLYMPUS, JAPAN)强会聚后形成激光光阱。实验装置中用 CCD(Coolsnap CF monocamera, USA)采集显微镜视场图像,用 QD 探测采集光阱中粒子的背散光强度。QD 核心是滨松公司(S1557, Hamamatsu, JAPAN)的四分光电管,光电灵敏度为0.57 A/W,进入 QD 的光强度为毫瓦数量级。对样品的精确定位和操控是借助压电扫描平台 PZT (piezoelectricity, P-517.3CL, PI, GERMAN)并结

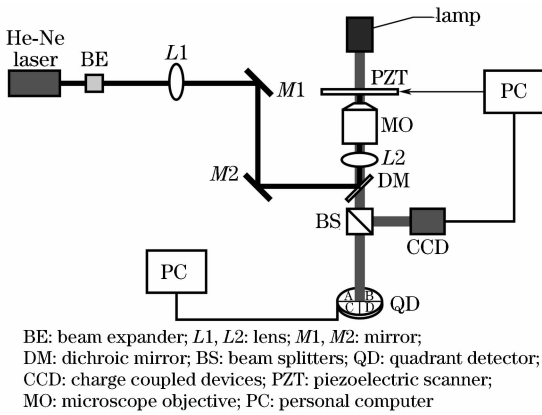


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

合计算机程序控制其运动来实现的。

实验采用的样品是聚苯乙烯小球 (PS, product of Duke Scientific Corporation, USA), 直径分别为 $1\ \mu\text{m}$ ($0.997 \pm 0.021\ \mu\text{m}$), $0.5\ \mu\text{m}$ ($498 \pm 5\ \text{nm}$), $0.2\ \mu\text{m}$ ($200 \pm 6\ \text{nm}$), $100\ \text{nm}$ ($102 \pm 3\ \text{nm}$), $73\ \text{nm}$ ($73 \pm 2.6\ \text{nm}$)。

3.2 实验流程

通过用 QD 实时测量光阱中 PS 小球的背散光强度, 判断光阱中的粒子个数。实验流程为: 光阱中没有粒子时, 首先用 QD 测量背景的反光强度。用光镊捕获一个 PS 小球, 用 QD 探测并采集此时的背散光信号, 然后使光镊再捕获第二个 PS 小球, 此时光阱中同时存在两个小球, 再次开启 QD, 探测并采集光阱中有两个粒子时的背散光信号。对于微米粒子, 采用主动捕获方式。对于显微镜无法直接观察的纳米粒子, 采用的是被动捕获方式。光阱依次增加捕获的粒子个数, 然后相应地测量粒子的背散光。

3.3 实验结果

3.3.1 微米粒子个数的分辨

当被捕获粒子直径为微米量级时, 由 CCD 拍摄

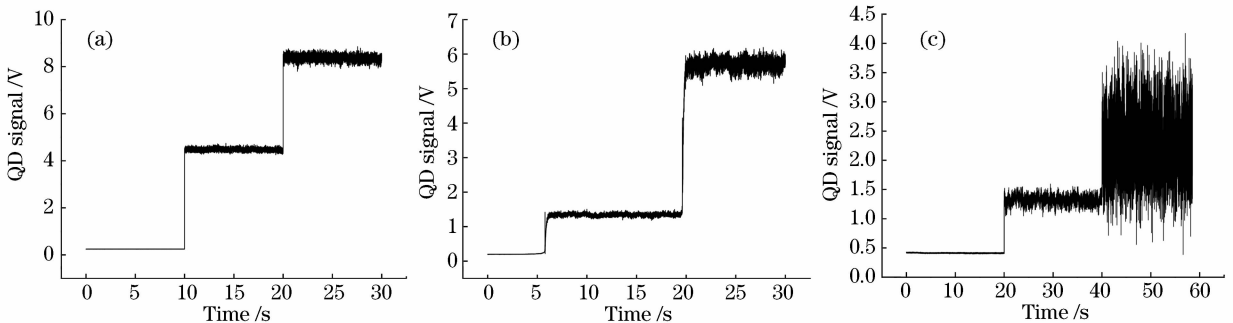
图 4 没有粒子、捕获 1 个、2 个直径为 (a) $1\ \mu\text{m}$, (b) $0.5\ \mu\text{m}$ 和 (c) $0.2\ \mu\text{m}$ 的 PS 小球时的背散光强度

Fig. 4 Variance of the signal from the quadrant detector signal of the cases without, with one and two PS particles.

(a) $d=1\ \mu\text{m}$, (b) $d=0.5\ \mu\text{m}$, (c) $d=0.2\ \mu\text{m}$ in the trap

的显微镜成像就可以直接辨别光阱中的粒子个数的状况。先用光镊捕获一个直径为 $1\ \mu\text{m}$ 的 PS 小球, 使用 CCD 拍摄其图像, QD 采集其背散光信号, 然后使光镊再捕获第二个直径为 $1\ \mu\text{m}$ 的 PS 小球, 此时光阱中同时存在两个 $1\ \mu\text{m}$ 小球, 再次使用 CCD 拍摄其图像, QD 采集其背散光信号。

通过 CCD 成像的区别可以识别光阱中的 PS 小球个数, 如图 3 所示。光阱先捕获 1 个 $1\ \mu\text{m}$ 粒子, 成像如图 3(a) 所示, 接着光阱再捕获第 2 个粒子时, 由于 2 个粒子是沿垂直观察面排列, CCD 观察到的粒子离开了焦平面, 其成像与捕获 1 个粒子时不同, 如图 3(b) 所示。根据两者成像的不同, 可以判断出光阱中粒子个数。

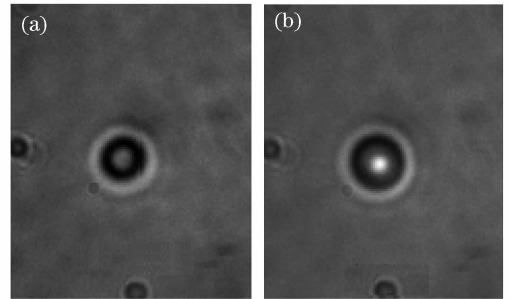
图 3 光阱分别捕获 1 个 (a) 和 2 个 (b) $1\ \mu\text{m}$ PS 小球的成像

Fig. 3 Imaging of one particle (a) and two particles (b) trapped in single optical trap

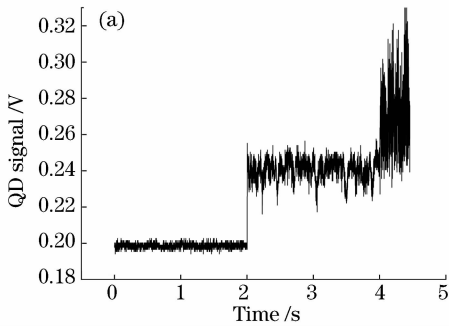
通过分析背散光信号, 也可以分辨出光阱中的 PS 微米小球个数。按照实验流程, 分别对直径为 $1, 0.5$ 和 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 PS 小球的背散光进行分析, 分辨了光阱中的粒子个数, 如图 4 所示。

如图 4(a) 所示的实验结果, 其中第一个台阶为当光阱中没有粒子时, QD 信号主要是玻片底面的反射光; 当光镊捕获一个粒子时, 背散光光强增大到第二个台阶; 光镊继续捕获第二个粒子以后, 背散光

光强继续增大到第三个台阶。一个微米粒子的背散光强度与两个微米粒子的背散光强度不同，两个粒子时的强度比一个粒子时的强度大。根据强度的不同与粒子个数的对应关系，可以得出光阱中微米粒子的个数。

3.3.2 纳米粒子个数的分辨

当粒子的直径降到 200 nm 以下时，由于显微镜的光学分辨能力和放大率的限制，此时已无法通



过显微镜清晰成像并借助 CCD 监测捕获的实时情况以分辨此时被捕获粒子的个数。对于纳米粒子，通过测量阱域的背散光强度的变化来辨别光阱中的粒子个数。

对直径分别为 100 nm 和 73 nm 的 PS 小球背散光进行了实验测量，当光阱中的粒子个数不同时，所记录的背散光强度如图 5 所示。

由图 5 可以看出，光阱中纳米粒子的个数不同

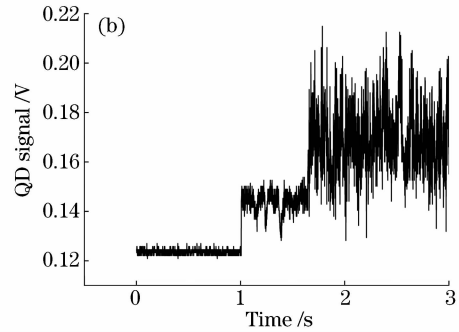


图 5 没有粒子、捕获 1 个、2 个直径为 (a) 100 nm 和 (b) 73 nm 的 PS 小球时的背散光强度

Fig. 5 Variance of the signal from the quadrant detector signal of the cases without, with one and two PS particles,

(a) $d=100$ nm, (b) $d=73$ nm in the trap

时，其背散光的强度也不同。由于强度的不同，可以反推出光阱中纳米粒子的个数。实验结果表明，当被捕获粒子的尺度小于亚微米量级而无法借助 CCD 监测并辨别光阱中粒子个数时，可以通过测量阱域的背散光强度变化来分辨光阱中的粒子个数。实验中成功地地区分了直径为 100 nm 和 73 nm 的纳米粒子在光阱中的个数。

用测量阱域的背散光强度来分辨光阱中的粒子个数的方法也可以分辨光阱中的多个粒子。以粒子直径为 73 nm 为例，如图 6 所示，光阱中从没有粒子

的背景强度的第一个台阶，依次捕获 1 个粒子、2 个粒子、3 个粒子和 4 个或 4 个以上的粒子，粒子的个数越多其背散光的强度越大，强度台阶越高。

3.4 讨论

散射光强度的变化反应了光阱中粒子的运动情况。不同大小和不同个数的小球在光阱中的散射光强 I ，小球布朗运动引起的光强变化 ΔI 以及两者的比值如表 1 所示，光强用 QD 输出的信号值表示， ΔI 通过统计光强 I 的标准偏差获得。

表 1 不同大小和不同个数的小球在光阱内的散射光强 I 及标准偏差 ΔI (捕获高度为 10 μm)

Table 1 Intensity of backscattering light and corresponding standard deviation ΔI (trapped depth of 10 μm)

Particle diameter / μm	Particle numbers	Intensity / V	ΔI / V	$\Delta I/I$ / %
1.000	1	4.210	0.060	1.4
1.000	2	8.100	0.100	1.2
0.500	1	1.320	0.050	3.8
0.500	2	5.200	0.100	1.9
0.200	1	0.910	0.070	7.7
0.200	2	1.800	0.500	27.7
0.100	1	0.042	0.006	14.3
0.100	2	0.070	0.020	28.6
0.073	1	0.019	0.005	26.3
0.073	2	0.040	0.010	25.0

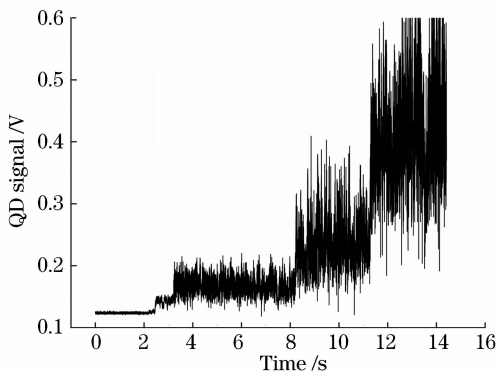


图 6 没有粒子、捕获多个 $d=73$ nm 的 PS 小球时的背散光强度

Fig. 6 Variance of the signal from the quadrant detector signal of the cases without and with multiple PS particles of the diameter $d=73$ nm in the trap

光阱只捕获一个粒子时,由表 1 可知,1) 背散射光强度随着粒子直径变小而变小;2) 粒子直径越小,其散射光强的相对变化量越大,主要原因是小球直径减小布朗运动加剧,布朗运动越剧烈,散射光强的振荡也越大;3) 当小球的大小和形成光镊的激光束的束腰 w 相近时,光镊的捕获效果最佳^[18],根据表 1 可得实验所用设备的光阱束腰 $w \approx 1 \mu\text{m}$ 。

当光阱捕获两个大粒子时,文献[19]的研究结果表明,两个小球被捕获在一个共同的平衡位置上,在这个平衡位置,两个小球相互接触,光镊对两个小球的作用力大小相等,方向相反。忽略粒子之间由于 DLVO 相互作用^[20]而产生的距离,这时(5)式变为

$$I = I_1 + I_2 + \frac{c}{2\pi} KK^* F_1 F_2^* \cos[k(\mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{s})] = I_1 + I_2 + \frac{c}{2\pi} KK^* F_1 F_2^* \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right), \quad (7)$$

式中 λ 为激光波长,当 $d = \lambda$ 时光强比 $I_{\text{double}}/I_{\text{single}}$ 的值最大。在 1, 0.5 和 0.2 μm 小球的实验中, $d = 0.5 \mu\text{m}$ 时 d 最接近 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, 因此其光强比最大。

当粒子半径 a 远小于 λ 时,光镊捕获瑞利粒子的情况已经有相关研究^[1,21]。光阱捕获单个瑞利粒子时,其散射力和梯度力表示为^[1]

$$F_{\text{scat}} = \frac{I_0}{c} \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) n_b, \quad (8)$$

$$F_{\text{grad}} = -\frac{n_b^3 a^3}{2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) \nabla E^2, \quad (9)$$

散射力 $F_{\text{scat}} \propto a^6$, 梯度力 $F_{\text{grad}} \propto a^3$, F_{scat} 和 F_{grad} 都随着粒子半径 a 的减小而很快变小。当 $a \ll w$ 时,只要小球在阱域内,可以认为粒子作自由布朗运动,因此粒子可以任意改变它们之间的相对位置,则(6)式中 \mathbf{R} 的空间取向是完全无规的, $\cos[k(\mathbf{R} \cdot \mathbf{s})]$ 项的平均值为 0, 有 $I = \sum_{i=1}^N I_i$ 。

本文提出的方法需要测量小球的背散射光强度,粒子的背散射光强度跟小球的直径、入射激光的功率、小球捕获位置等因素有关。在不同的捕获高度,相同直径粒子的背散射光强度并不一致,同理不同个数粒子的背散射光强度在不同的捕获高度也不一样,因此在实际应用中,要在不同的捕获高度下分辨光阱中粒子个数,需要标定不同捕获高度的背散射光强度。当 $d \ll \lambda$ 时,粒子对入射光的散射为瑞利散射,其散射光强^[20]

$$I = A \frac{V^2}{\lambda^4} I_0 \propto a^6, \quad (10)$$

式中 A 为常数,此处 V 具体为单个粒子的体积。随着 λ 的减小, I 急剧减小,如果想探测到粒子的散射光,需要比较高的激光功率。当粒子直径非常小时,则粒子总的散射光强 $I = \sum_{i=1}^N I_i$, 要想分辨光阱中的粒子个数, QD 的探测精度必须达到探测单个粒子的散射光精度。

由于光阱中的小球受到周围液体中分子的撞击作布朗运动,观察到的散射光强度将不断地随时间起伏涨落。分析这些散射光强度随时间涨落的变化可获得与粒子直径有关的分散小球的相关信息,用于研究纳米粒子的动力学行为^[22,23]。

4 结 论

根据光散射原理,提出通过测量粒子的背散射光的光强,实时动态分辨光阱中的纳米粒子个数,实验上分别对光阱中所捕获的直径为 1 μm , 0.5 μm , 0.2 μm , 100 nm 和 70 nm 的粒子的背散射光进行了测量,成功地分辨了光阱中的纳米粒子个数。对光阱中有不同粒子时的状态进行了讨论,探讨了光阱中不同粒子的排布状态。结果结合纳米粒子的超显微观测手段^[24],对将光镊的应用研究扩展到纳米尺度提供了技术支持,可应用于生物科学和胶体化学等研究领域。

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 X. W. Zhuang. Unraveling DNA condensation with optical tweezers [J]. *Science*, 2004, **305**(5681):188~190
- 3 M. Zhou, H. F. Yang, J. K. Di *et al.*. Manipulation on human red blood cells with femtosecond optical tweezers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(12):919~921
- 4 F. Gittes, B. Schnurr, P. D. Olmsted *et al.*. Microscopic viscoelasticity: Shear moduli of soft materials determined from thermal fluctuations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(17):3286~3289
- 5 R. R. Brau, J. M. Ferrer, H. Lee *et al.*. Passive and active microrheology with optical tweezers [J]. *J. Opt. A-Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(8):S103~S112
- 6 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
- 7 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
- 8 Wu Zhongfu, Liu Zhihai, Guo Chengkai *et al.*. Numerical

- simulation and experiments of two fiber optical tweezers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10):1971~1976
- 吴忠福,刘志海,郭成凯等. 两种单光纤光镊捕获效果的数值仿真与实验研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10):1971~1976
- 9 Gao Qiujuan, Zhu Yanying, Shi Jinshan *et al.*. Rotation of particles by using the beam with spin angular momentum [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10):1505~1509
- 高秋娟,朱艳英,史锦珊等. 利用具有自旋角动量的光束实现微粒的旋转[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10):1505~1509
- 10 K. Berg-Sørensen, H. Flyvbjerg. Power spectrum analysis for optical tweezers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(3):594~612
- 11 Z. W. Sun, S. H. Xu, G. L. Dai *et al.*. A microscopic approach to studying colloidal stability [J]. *J. Chem. Phys.*, 2003, **119**(4):2399~2405
- 12 M. Li, J. Arlt. Trapping multiple particles in single optical tweezers [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1):135~140
- 13 K. Ajito, K. Torimitsu. Single nanoparticle trapping using a Raman tweezers microscope [J]. *Appl. Spectrosc.*, 2002, **56**(4):541~544
- 14 C. Hosokawa, H. Yoshikawa, H. Masuhara. Optical assembling dynamics of individual polymer nanospheres investigated by single-particle fluorescence detection [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(6):061410
- 15 L. Jauffred, A. C. Richardson, L. B. Oddershede. Three-dimensional optical control of individual quantum dots [J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(10):3376~3380
- 16 R. S. Stein. The Application of Scattering and Birefringence on the Study of Polymer Morphology [M]. Xu Mao Transl.. Beijing: Science Press, 1983. 9~17
- R. S. 斯坦. 散射和双折射方法在高聚物织构研究中的应用 [M]. 徐 懋译. 北京:科学出版社, 1983. 9~17
- 17 Chen Hongtao, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. Detection of nanometer displacement in optical tweezers and its related measuring errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):729~734
- 陈洪涛,李银妹,楼立人等. 光镊技术中的纳米位移探测及其测量误差讨论[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):729~734
- 18 A. Rohrbach, E. H. K. Stelzer. Trapping forces, force constants, and potential depths for dielectric spheres in the presence of spherical aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(13):2494~2507
- 19 S. H. Xu, Y. M. Li, L. R. Lou. Axial optical trapping forces on two particles trapped simultaneously by optical tweezers [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(13):2667~2672
- 20 Jiang Long. Introduction to Colloid Chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2002. 88~113
- 江 龙. 胶体化学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 88~113
- 21 Y. Harada, T. Asakura. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **124**(5-6):529~541
- 22 R. Barziv, A. Meller, T. Tlustý *et al.*. Localized dynamic light scattering: probing single particle dynamics at the nanoscale [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(1):154~157
- 23 N. B. Viana, R. T. S. Freire, O. N. Mesquita. Dynamic light scattering from an optically trapped microsphere [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(4):041921
- 24 J. H. Zhou, L. J. Qu, K. Yao *et al.*. Observing nanometre scale particles with light scattering for manipulation using optical tweezers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(1):329~331

《中国激光》编委、国防科大刘泽金教授荣立一等功

中华人民共和国中央军事委员会主席胡锦涛日前签署通令,给 8 个单位、14 名个人记功。《中国激光》编委、国防科学技术大学光电科学与工程学院院长刘泽金教授由于在科学技术研究中取得显著成绩被记一等功。

刘泽金教授简介:

刘泽金(1963—),男,山东人,教授,博士生导师,长期从事高能激光技术等方面的研究,是国务院学位委员会第六届学科评议组成员、教育部创新团队带头人、军队领军科技人才培养对象,已获得国家科技进步一等奖 1 项,军队和部委级科技进步一等奖 7 项,公开发表学术论文 110 篇,合作出版教材一部;2005 年曾获中国科协杰出青年“求是”工程奖。