操控金属粒子的光镊技术

Manipulating Metallic Particles Using Optical Tweezers

陈冠雄 1.2 周金华 1.2.3 任煜轩 1.2.3 李银妹 1.2.3

(1 中国科学技术大学 物理系, 安徽 合肥 230026

2 中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026

3 中国科学技术大学 安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026

Chen Guanxiong^{1,2} Zhou Jinhua^{1,2,3} Ren Yuxuan^{1,2,3} Li Yinmei^{1,2,3}

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

- 2 Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, University of Science and Technology of China Hefei, Anhui 230026, China
- 3 Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, University of Science and Technology of China Hefei, Anhui 230026, China
- 摘 要 金属微粒由于其独特的化学以及电磁性质,在生物医学和表面化学领域的应用越来越广泛,利用光镊俘获 金属微粒的报道也越来越多,可操控的金属粒子尺寸也越来越小。光镊作为一种重要的捕获微小粒子的工 具,在早期多用来捕获胶体颗粒及生物细胞等透明粒子,很少有报道用光镊来捕获像金属粒子一类的不透 明粒子。综合了近年来出现的利用光镊俘获金属粒子的技术,从原理、实验设备、实验环境等方面对现有俘 获金属粒子的技术做一个全面的介绍。
- 关键词 光镊;金属粒子;纳米粒子;操控
- **Abstract** Metallic particles have many special chemical and electromagnetic properties compared with dielectric particles, and their potential applications in biology and surface chemistry are ravishing. So scientists and technicians have tremendous interest to develop technologies of trapping metallic particles. As a very important technique, optical tweezers were mostly used to trap transparent particles in the past, especially biological cells. Since metallic particles are opaque, it is difficult for trapping them by common optical tweezers. In recent years, there are more and more exciting reports about trapping metallic particles using optical tweezers. The development of trapping metallic particles using optical tweezers and equipments, is introduced.

Keywords optical tweezers; metallic particles; nanoparticles; manipulation

中图分类号 O438 doi:10.3788/LOP20094606.0032

1 引言

自从 1986 年 Ashkin 等^[1, 2]发现强聚焦的光束可 以俘获微小粒子以来,这种单光束光阱得到了显著的 发展。俘获粒子的尺度逐渐由微米延伸到纳米,包括 细胞、乳胶小球等。由于它对被俘获粒子的活性影响 很小,在生物实验中的应用非常广泛,不仅能直接操 纵细胞,而且能操纵硅胶粒子和细胞粘结。

当光被粒子表面反射、吸收以及折射时,它的传

32 激光与光电子学进展 2009.06

播方向会发生改变,动量也随之改变,根据动量守恒 定理,粒子会获得光子损失的动量,进而表现为受到 光的作用力。光被粒子反射和吸收而施加在粒子上的 力叫散射力,一般表现为推力,由于被折射而施加在 粒子上的力叫梯度力,一般表现为拉力。要稳定俘获 粒子,光施于粒子的推力和拉力就要平衡。传统的单 光束梯度力光镊俘获粒子需要粒子的折射率大于周 围介质的折射率,它一般只能俘获透明或半透明的粒 子;对于折射率小于介质折射率的微粒而言,粒子受 力指向光强最弱处,受力不平衡,粒子被推离出光阱。

随着近年纳米科技迅速发展,提出了对诸如金属 粒子等非透明粒子操纵的应用需求。由于金属粒子的 化学活性高于硅胶小球,在生物实验中它更容易与细 胞结合,在化学实验中它的表面有很好的催化效果, 能有效地成为化学反应的场所,因此金属粒子的应用 越来越广泛,相应地俘获它的技术也越来越重要。金 属粒子的典型特性是对光有很高的反射率,而折射率 则远小于周围介质,因为金属粒子几乎不透光,那么 散射力将起主要作用,梯度力就平衡不了散射力,粒 子受力指向光传播方向导致粒子逃逸。因此,单光束 梯度力光阱难以稳定俘获金属粒子,这就需要对目前 的单光束光阱技术进行改进。

近年来已有一些不断改进光镊技术尝试对金属 微粒俘获的报道^[3-5]。根据粒子的尺度,将这些方法分 为两类:一类为微米/亚微米量级金属粒子的光俘获 方法,一类为纳米金属粒子的光俘获方法。本文旨 在介绍已有的利用光镊俘获和操纵金属粒子的技术, 从原理、实验设备、实验环境等方面力图对现有俘获 金属粒子的技术做一个全面而简略的介绍。

2 金属粒子的光俘获原理

根据金属粒子的不同尺寸和捕获特点,可以将粒子分为微米/亚微米量级金属粒子和纳米金属粒子两类,下面分别介绍光捕获原理和实现方法。

2.1 微米/亚微米量级金属粒子的光俘获原理

普通的基于单光束梯度力的光镊难以稳定俘获 金属粒子的主要原因是由于金属粒子的高反射和高 吸收特性。因为高反射、高吸收引起的是散射力,它一 般表现为推力,而梯度力一般表现为拉力,这样作用 在金属粒子上的推力要大于拉力,无法被稳定俘获。 若利用激光对金属粒子的推力,将粒子推向中心区域 就可以实现金属粒子稳定地俘获在一定区域。对微 米/亚微米级金属粒子一般采用的就是这类方法,它 充分利用了金属高反射的特点,使作用在它上面的 "推力"起俘获作用。这类方法包括扫描光镊方法、底 部聚焦法和环形光阑法。

2.2 纳米量级金属粒子的光俘获原理

对于纳米量级的金属粒子,一般根据力的计算公 式来比较散射力和梯度力的大小,进而判断粒子能不 能被俘获,甚至可以进行稳定性分析。

对计算作用在半径远小于波长的粒子上的力,根据偶极近似^[6,7],梯度力可表示为

$$\boldsymbol{F}_{\text{grad}} = \operatorname{Re}(\alpha) \boldsymbol{\varepsilon}_0 \Delta |\boldsymbol{E}|^2 / 4. \tag{1}$$

(1)式显示梯度力与电场强度平方的梯度成正比。其
中 ε₀ 为真空介电常数, α 为金属粒子的极化率

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon_1(\varepsilon - \varepsilon_1)}{(\varepsilon + 2\varepsilon_1)}, \qquad (2)$$

其中 $\varepsilon, \varepsilon_1$ 分别为金属粒子和周围介质的介电常数。金属粒子的介电常数(即折射率的平方 $\varepsilon=n^2$)和波长有关系。

反射和吸收引起的力的轴向分量表达式分别为

$$F_{\text{scat},z} = n_1 \langle S \rangle_z C_{\text{scat}} / c, \qquad (3)$$

$$F_{\text{abs},z} = n_1 \langle S \rangle_z C_{\text{abs}} / c, \qquad (4)$$

其中c为光速, $\langle S \rangle_z$ 为轴向上坡印廷矢量的时间平均 值,它的表达式

$$\langle S \rangle_z = \operatorname{Re}\{(\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^*)_z\}/2,$$
 (5)

其中 n₁为周围介质的折射率, C_{scat}和 C_{abs}分别为散射 横截面和吸收横截面, 它们的表达式分别为

$$C_{\text{scat}} = k_0^4 |\alpha|^2 / 6\pi,$$
 (6)

$$C_{\rm abs} = k_1 {\rm Im}(\alpha) / \varepsilon_1, \tag{7}$$

其中 k₀ 为真空中波矢量大小,k₁ 为周围介质中的波矢量大小。

判断能否稳定地捕获金属粒子,通常有一些稳定 性判据,如:

 1)梯度力的轴向分力要能抵消点散射力和吸收 力,稳定性判据定义为

$$R = F_{\text{grad},z} / (F_{\text{scat},z} + F_{\text{abs},z}) \ge 1$$
,

更保守的做法是用 $R = F_{\text{grad},z}^{\text{max}} / (F_{\text{scat},z}^{\text{max}} + F_{\text{abs},z}^{\text{max}}) \ge 1$ 来估 计稳定性;

2)由梯度力形成的势阱要足够深,能克服布朗运动的动能,这里的判据是

$$R_{\text{Thermel}} = \exp(-U_{\text{max}}/k_{\text{B}}T) = 1$$
,

$$U_{\max} = \varepsilon_0 \operatorname{Re}(\alpha) |E|_{\max}^2 / 2.$$

(8)

3)梯度力要能平衡粒子重力。根据力的计算公式,梯度力与电场强度平方的梯度成正比,因此寻找变化梯度很大的光场是这类方法的关键,这类方法包括径向偏振光方法和瞬逝波方法。

REVIEW | 综合评述

3 金属粒子的光捕获方法

根据金属粒子尺度的不同,实现金属粒子俘获的 方法也有所差别。对微米和亚微米尺度的金属粒子, 在普通的光学显微镜下即可清晰观察,但由于激光对 粒子的散射力较大,不易在普通的光镊中实现。若采 用环形光等技术就可以实现对微米和亚微米量级金 属粒子的捕获和观察。但对于纳米级的金属粒子,强 会聚的单光束可以直接俘获粒子。值得注意的是,由 于受普通光学显微镜衍射极限的限制,不能清晰地观 察粒子。为方便观察纳米级金属粒子的影像,需要结 合微分干涉差(DIC)和激光共聚焦等技术。

3.1 微米/亚微米金属粒子的光俘获方法

对于微米/亚微米尺度的金属粒子的操控,主要利 用金属粒子对激光高反射的特性而形成散射力来实 现。通过一定的实验技术,用激光将金属粒子推向特 定的区域实现金属颗粒的稳定捕获。常用的实验技术 有扫描光镊法、底部聚焦法和环形光阑法等。

3.1.1 扫描光镊方法 扫描光镊是一种使光镊按着某一设定轨道往复

扫描的技术^[8-10],如图1所示,单光阱沿圆形轨道扫描 俘获高折射率粒子。





图1中所示,(c)和(d)为(a)所示普通光镊形成 的势阱,(e)为扫描光镊(b)形成的势阱。(c)图显示当 粒子折射率大于周围介质折射率时,粒子被俘获的势 阱,(d)图则显示了当粒子折射率小于周围介质折射 率时(如金属粒子),粒子不能被俘获的势阱。(e)图显 示了利用扫描光镊形成俘获折射率小于周围介质折 射率或者高反射率粒子的势阱。

Sasaki 等^[8]采用扫描光镊实现对金属铁粒子的俘获。捕获激光采用功率 145 mW, 波长 1064 nm 的 TEM₀₀模的高斯光束通过油浸物镜形成强会聚的光束,扫描频率 50 Hz,如图 2 所示。选用 1064 nm 的红外光是因为铁粒子对它的吸收低,可以尽量减少热量 对俘获稳定性的干扰。采用这种方法实现了对金属粒

子的二维俘获。

3.1.2 底部聚焦方法

利用金属粒子在激光束焦点底部附近的不对称 分布,粒子将受到不均匀的作用力,达到粒子受此作 用力被推到对称的分布位置,这种方法就是底部聚焦 法^[11]的基本原理。



图 2 光镊对铁粒子的俘获

考虑粒子的横向受力,如图 3(a)所示,激光会聚 焦点在粒子的底部,且光不是相对于粒子对称分布 的,由于右边部分受力大于左边,粒子将被推向光最 强处;当推过了对称位置后,左边受力就大于右边了, 这和梯度力的作用是一样的,实际上它是由于反射引 起的力,这样粒子就被稳定在对称位置。图 3(b)是光 会聚焦点在粒子上面时,粒子受到横向的作用力被推 向远离焦点处,粒子不能被俘获。这样粒子就能在二 维方向上被光阱所操纵。

如图 4 所示,在功率 8 mW,波长 1064 nm 的激 光通过数值孔径 1.2 的水浸物镜聚焦后,实现了对 2~ 5 μm 金粒子的二维操控。



图 3 非对称光场作用粒子底部聚焦光路图

3.1.3 环形光阑法

环形光阑法^[12]类似于扫描光镊,如果对光束进行

34 激光与光电子学进展 2009.06

REVIEW | 综合评述





图 4 光镊操控 2~5 µm 金粒子

整形使其变成一束环形光,那么它能像扫描光束一样 中间形成势阱。利用散射力对金属粒子进行俘获,最 容易想到的就是直接将一束光的中间部分遮住。用环 形光阑法需要注意的是,遮光的尺寸是影响俘获效率 的一个重要因素。

如图 5 所示,进行金属粒子捕获和操控的实验设备和参数:氩离子激光器,波长 488 nm,功率 1.5 W, 油浸物镜数值孔径 NA=1.25,一个不透明的圆片同轴地



图 5 环形光镊产生原理

放置在光场中间,捕获水溶液中直径 2 μm 的金粒子。 **3.2 纳米金属粒子的光俘获方法**

1994年,Svoboda等^[13]首先报道了用单光束捕获 直径 36 nm 的纳米金粒子。此后由于实验技术的限 制,纳米金属粒子的激光捕获似乎沉寂了多年。然而, 纳米级金属粒子可以产生表面等离子体共振实现局 域电场增强,在表面增强拉曼光谱^[14,15]、表面增强荧光 以及生物医学等领域有着重要的应用。在近几年的科 研中对金属粒子的捕获和操控又被人们所关注。2005 年,Hansen等^[3]单光束光镊捕获直径 18~254 nm 的金 小球,这扩大了纳米金粒子捕获的范围。2008 年 Bosanac等^[16]首次实现单个银纳米粒子的三维捕获。

与微米/亚微米金属粒子捕获不同的是,纳米金属 颗粒的捕获在常规的显微镜下难以观察,这给判断是 否捕获增加了难度。不过,通过四象限探测器探测在 光阱区域的金属粒子位移的方法,通过位移的功率谱 可以判断金属粒子是否被捕获。粒子的判断还可以通 过微分干涉差或激光共聚焦显微镜等来实现。

图 6(a)和(b)分别是被捕获的金和银纳米粒子 的位移功率谱信号。其中,图(a)中的红、蓝、绿三色分 别代表直径为 196 nm,30 nm 的金粒子和噪声的功 率谱信号^[3];图(b)中的红、蓝、绿三色分别代表直径 为 60 nm,275 nm 的银粒子和噪声的功率谱信号^[16]。

纳米粒子的观察可以通过微分干涉差显微镜或 激光共聚焦显微镜来实现。图 7 为在 DIC 显微镜中拍 摄粘在玻片表面的纳米金粒子的影像^[3],粒子的直径 在 30~154 nm。更大直径的粒子在明场显微镜中可以 清晰地观察到。

2008年,Bosanac 等¹⁶⁹采用功率为10W和波长为1064 nm 的红外激光(Spectra Physics Millennia)首次 实现单个银纳米粒子的三维捕获。他们用四象限探测器 (S5981, Hamamatsu)来探测纳米粒子的三维位置。

通过将激光束引入到共聚焦显微镜,就可以在捕获的同时观察纳米级银粒子的散射光。共焦成像^[16]是用 Leica SP5 共焦显微镜上使用 488 nm Ar 线在反射模式实现的。引入一束功率为 5 W 波长为 1064 nm 的激光到共焦显微镜捕获形成光镊,这样就可以实现同时观测纳米粒子。图 8 为激光共聚焦显微镜观察到的 60 nm 的银粒子。

2008年,Selhuber-Unkel等¹⁰⁷定量分析了作用在 被捕获的单个金纳米棒的受力。使用波长在金等离子 共振波长以上波长的激光,能够稳定地捕获直径在 8~44 nm,纵横比(aspect ratios)在 1.7~5.6 的单个纳米 棒。光阱的电磁场与单个金纳米棒的相互作用和粒子的 \square



图 6 (a)图中红色和蓝色曲线分别为被捕获的直径为 196 nm 和 30 nm 的金粒子的功率谱,实线为数据 的洛仑兹拟合结果,绿线为空光阱的功率谱;(b)图 中红色和蓝色曲线分别为被捕获的直径为 60 nm 和 275 nm 的纳米银粒子的功率谱,实线为数据的 洛仑兹拟合结果,绿线为空光阱的功率谱



图 8 激光共聚焦显微镜观察到的 60 nm 的银粒子 取向有关,随粒子体积和纵横比的变化而变化。 3.3 操纵金属粒子的其他技术

在金属粒子操控技术的发展过程中,还发展了一 些有特色的激光捕获技术。如用全息光镊同时俘获几 个透明粒子,然后用它们去夹金属粒子,就像制造出 了一个机械手一样,间接操纵金属粒子。为形成多个 光镊操控多个粒子,需要用到全息光镊技术^[18-2]。它是 利用衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)或可编程的空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)对光进行整形进而在光镊操控区域 形成多光镊,如阵列光镊或其他形状排布的多光镊。

图 9 为用空间光调制器形成的多光镊捕获硅小球进而间接操控铬粒子的示意图。所用物镜的数值孔 径为 N.A.=1.3,放大倍率为 100 倍,激光光源采用功率为 3 W,波长为 515 nm 的二极管激光发射器,空间光调制是由 Holoeye 的 LC-R 2500 型空间光调制器实现的。



图 9 用全息光镊同时控制 4 个硅珠子,夹住一个铬粒子

此外,当光进入金属表面时,会以指数形式衰减, 这样形成的电磁波叫倏失波。由于金属表面倏失波的 梯度较大,会对金属粒子产生较大的作用力,因而可 以利用倏失波^[28-25]来捕获金属粒子。当光在金属表面 传播时,会和表面的自由电子发生相互作用,电子会 振荡。当激光频率和电子振荡频率接近时,电子振荡 最激烈。这种振荡会改变周围电磁场的性质,这种现 象叫表面等离子体共振(surface plasmon)^[26-29]。表面 等离子体共振其实是一种表面电磁波模式,也称爬行 波^[29]。通常发生共振时,局域场的强度会得到增强,这 样就使俘获力得到显著增强。结合倏失波和表面等离 子体共振,适当选择入射波长,当梯度力大到一定程度 时,它的横向分量就可能抵消掉消光的散射力,纵向分 量将粒子拉向实验平台表面,从而实现俘获。

4 总结

光镊技术经过二十多年的发展,操纵微米尺度的 介电小球已经很容易地在一般的实验室实现,结合暗 场观察^[30]或微分干涉等其他技术,科研人员可以实现 在观察的同时捕获纳米级的微小粒子。捕获微米或纳 米级的介电小球在分子生物学、胶体化学等领域从微 观层次上给人们提供了生物大分子机械力学特性^[31]、 细胞膜弹性以及胶体间相互作用^[32]等信息。随着人们

_

认识的不断加深,操控非介电小球的应用前景已经崭露头角。金属粒子的操控则是近几年激光捕获技术研究的热门课题之一。

由于金属粒子独特的特性,它在生物医药和表面 化学等领域的应用越来越广泛,在这些微观操作中, 精准的定位,精细的操纵十分重要,为了适应这种需 求,技术人员发展了光镊俘获、操纵金属粒子技术。本 文根据金属粒子的尺度,将其分为微米/亚微米金属 粒子和纳米级金属粒子,并介绍了各自的俘获原理和 俘获方法。微米和亚微米金属粒子的光俘获方法的主 要特点是利用金属粒子高反射率的特性,变"推力"为 "拉力"来实现俘获,如扫描光镊法、底部聚焦法、环形 光阑法等;纳米金属粒子由于瑞利衍射的限制在一般 的明场显微镜下是不能清晰分辨的,实现纳米级金属 粒子捕获的关键是能够确定粒子的位置,常用的方法 是通过四象限探测器接受粒子的散射光来精确定位 粒子在光阱中的位置从而确定是否被捕获。此外还可 以通过微分干涉像差显微镜或激光共聚焦显微镜来 观察纳米级金属粒子。

鉴于光镊技术捕获金属粒子尤其是纳米级的金 属粒子的研究为拓展光镊技术的应用领域、充分挖掘 光镊技术的潜力迈进了重要的一步,本文将为探索光 镊技术在对其他粒子如半导体颗粒、纳米级磁性微球 等的捕获提供一定的借鉴。

收稿日期: 2008-10-07; 收到修改稿日期: 2008-12-29

基金项目:国家 863 计划(2007AA021811, 2007AA02809)和中科院 知识创新工程(KJCX2-YW-H-10)资助课题。

作者简介:陈冠雄(1985-),男,硕士研究生,主要从事纳米材料方面的研究。

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

导师简介:李银妹(1953-),教授,博士生导师,主要从事光学和激 光应用方面的研究。

E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn

- 1 Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E. *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5): 288~290
- 2 Ashkin A., Dziedzic J. M.. Internal cell manipulation using infrared laser traps [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 1989, 86: 7914~7918
- 3 Hansen P. M., Bhatia V. K., Harrit N. *et al.*. Expanding the optical trapping range of gold nanoparticles [J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(10): 1937~1942
- 4 Pelton M., Liu M., Kim H. Y. et al.. Optical trapping and alignment of single gold nanorods by using plasmon resonances [J]. Opt. Lett., 2006, 31(13): 2075~2077
- 5 Dienerowitz M., Mazilu M., Reece P. J. *et al.*. Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(7): 4991~4999
- 6 Harada Y., Asakura T.. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime [J]. Opt. Commun., 1996, 124: 529~541
- 7 Chaumet P. C., Nieto-Vesperinas M.. Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1065~1067
- 8 Sasaki K., Koshioka M., Misawa H. *et al.*. Optical trapping of a metal partical and a water droplet by a scanning laser beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60(**7): 807~809
- 9 Sasaki K., Koshioka M., Misawa H. et al.. Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation[J]. Opt. Lett., 1991, 16(19): 1463~1465
- 10 Misawa H., Sasaki K., Koshioka M. et al.. Multibeam laser manipulation and fixation of microparticles[J]. Appl. Phys. Lett., 1992, 60(3): 310~312
- 11 Sato S., Harada Y., Waseda Y.. Optical trapping of microscopic metal particles[J]. Opt. Lett., 1994, 19(22): 1087~1089
- 12 Gu M., Morrish D., Ke P. C.. Enhancement of transverse trapping efficiency for a metallic particle using an obstructed laser beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(1): 34~36
- 13 Svoboda K., Block S. M. Optical trapping of metallic Rayleigh particles[J]. Opt. Lett., 1994, 19(13): 930~932
- 14 Svedberg F., Li Z. P., Xu H. X. et al.. Creating hot nanoparticle pairs for surface-wenhanced Raman aspectroscopy through optical manipulation[J]. Nano Lett., 2006, 6(12): 2639~2641

- 15 Han H., Fang Y., Li Z. *et al.*. Tunable surface plasma resonance frequency in Ag core/Au shell nanoparticles system prepared by laser ablation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 023116
- 16 Bosanac L., Aabo T., Bendix P. M. et al.. Efficient optical trapping and visualization of silver nanoparticles [J]. Nano Lett., 2008, 8(5): 1486~1491
- 17 Selhuber–Unkel C., Zins I., Schubert O. et al.. Quantitative optical trapping of single gold nanorods[J]. Nano Lett., 2008, 8(9): 2998~3003
- 18 Lee W. M., Dholakia K.. Optically trapped and controlled microapertures for studies of spatial coherence in an arbitrary light field[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 261101
- 19 Grier D. G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810~816
- 20 Volke-Sepulveda K., Chavez-Cerda S., Garces-Chavez V. et al.. Three-dimensional optical forces and transfer of orbital angular momentum from multiringed light beams to spherical microparticles[J]. J. Opt. Soc. Ame. B, 2004, 21 (10): 1749~1757
- 21 Tang H., Xu G. Y., Weng L. Q. et al.. Luminescence and photophysical properties of colloidal ZnS nanoparticles[J]. Acta Materialia., 2004, 52(6): 1489~1494
- 22 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
- 23 Quidant R., Zelenina S., Nieto-Vesperinas M.. Optical manipulation of plasmonic nanoparticles [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2007, 89(2): 233~239
- 24 Volpe G., Quidant R., Badenes G. et al.. Surface plasmon radiation forces [J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96 (23): 8101~ 8104
- 25 Toussaint K. C., Liu M., Pelton M. et al.. Plasmon resonance–based optical trapping of single and multiple Au nanoparticles [J]. Opt. Exp., 2007, 15(19): 12017~12029
- 26 Barnes W. L., Dereux A., Ebbesen T. W.. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424: 824~830
- 27 Gu M., Ke P. C.. Image enhancement in near-field scanning optical microscopy with laser-trapped metallic particles [J]. Opt. Lett., 1999, 24(2): 74~76
- 28 Sugiura T., Okada T., Inouye Y. et al.. Gold-bead scanning near-field optical microscope with laser-force position control[J]. Opt. Lett., 1997, 22(22): 1663~1665
- 29 Furukawa H., Yamaguchi I.. Optical trapping of metallic particles by a fixed Gaussian beam [J]. *Opt, Lett.*, 1998, **23** (3) : 216~218
- 30 Zhou J., Qu L., Yao K. et al.. Observing nanometre scale particles with light scattering for manipulation using optical tweezers[J]. Chin. Phys. Lett., 2008, 25(1): 329~331
- 31 沈为民,李银妹,乐加昌等.光镊技术测量生物大分子间的结合强度[J]. 应用激光, 2004, 24(8): 233~236
- 32 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