

包覆较厚介质层的金属铜球在聚焦光场中的捕获特性研究

程书博¹, 邬亮¹, 陶少华^{1,2}

(1. 中南大学 物理与电子学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学 物理与电子学院 超微超快过程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于核(金属)/壳(介质)微球的单光束梯度阱模型, 计算了外面包覆较厚聚苯乙烯的铜微球在聚焦光场中的轴向散射力、梯度力以及合力, 分析了表面被高度氧化的铜微球的轴向捕获力。不同于纯金属米氏粒子, 外层包覆较厚介质材料的金属粒子在聚焦光场中容易被捕获但不能被捕获在聚焦光束的高强度区域。光学微操作实验显示: 高度氧化的铜微球能被聚焦的高斯光束捕获并可以在平面内移动。理论和实验结果便于研究核壳结构金属微粒的光学特性, 进一步拓展了光镊技术的应用范围。

关键词: 单光束梯度阱; 微球; 光学捕获

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0621002

Optical trapping characteristics of a metal microsphere coated with thick dielectric shell in the focused optical field

Cheng Shubo¹, Wu Liang¹, Tao Shaohua^{1,2}

(1. School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory for Super-microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The scattering, gradient and net forces exerted on the metallic microspheres with the thick shell were calculated and the axial trapping force exerted on the oxidized copper microspheres with a force model were analyzed for a single-beam gradient trap on a core-shell (metal/dielectric) microsphere. Unlike the case for a purely metallic Mie particle, a metallic microsphere with thick dielectric shell can be trapped easily, but not be trapped in the high intensity region of focused beam. In the experiment the copper microparticles coated with copper oxide can be trapped in the focused Gaussian beam and also transported horizontally. The optical characteristics of core-shell structured metal particles could be analyzed with the theoretical analysis and experimental results, which extend the applications of optical tweezers.

Key words: single-beam gradient trap; microsphere; optical trapping

收稿日期: 2015-10-24; 修订日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(61178017)

作者简介: 程书博(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学整形及光镊技术研究。Email: ccssbb-06@163.com

导师简介: 陶少华(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光子器件、激光光束传输与控制及应用等方面的研究。

Email: eshtao@csu.edu.cn

0 引言

激光器以其独有的高相干、高准直及高功率等特性,在光镊技术、激光成像、激光加工与焊接、光通信、光学存储、光学加密解密、现代成像技术以及基础光学研究等领域有着广泛应用^[1-21]。其中,光镊技术^[3]常被用来捕获微米级甚至纳米级粒子诸如聚苯乙烯(PS)微球等,其在生物学、物理学、医学以及其他科研领域有着重要作用^[4-9]。聚焦光束对微米级粒子的力学特性尤为重要,基于电磁波及几何光学理论,许多计算辐射力的数值方法被提出,例如,时域有限差分法(FDTD)^[10-11]、离散偶极近似理论(DDA)^[12]、T 矩阵理论^[13-14]、麦克斯韦应力张量法^[15-16]等。纯介质或金属微球在聚焦光场中的受力特性已经被广泛研究并且此类微粒的光学微操作实验也有较多报道^[17]。近年来,表面包覆介质材料尤其是半导体材料的金属微粒^[18-19]被制备出来,并广泛地应用在光电子领域,这些表面包覆介质的金属粒子在现实生活中普遍存在且在各种科研领域有着重要的作用。表面包覆较厚介质层的金属微球在聚焦光场中的受力具有显著特性,壳层较薄时,没有光束直接从介质壳折射出来,梯度力明显较小,散射力较大;当壳层较厚的时候,许多光线直接经介质层折射出去,产生较大的梯度力,使得微球更容易被捕获。文中基于核(金属)/壳(介质)微球在聚焦光场中的力学模型^[20],计算了 Cu(核)/PS(壳)及 Cu(核)/CuO(壳)核壳结构微球在聚焦光场中的轴向捕获效率,分析了壳层厚度对微球受力特性的影响。为了验证理论的合理性,以被氧化的 Cu 微球作为研究对象,依托以倒置显微镜为核心的光镊系统进行了光学微操作实验。基于理论和实验结果,可以利用光镊技术对特定金属微粒的表面等离子体共振特性进行研究,也便于设计较为合理的核壳结构金属微球以实现金属微粒的最优捕获。

1 理论模拟与实验分析

单光线照射到核壳结构微球上的几何光路如图 1 所示。基于参考文献[20]中的几何光学模型,单光线对表面包覆介质的金属微球(微球直径 $d \gg \lambda$)的散射力与梯度力沿 Z 轴的分量可写为:

$$F_x = \frac{n_0 P}{c} (1 + R_1 \cos 2\theta) + \frac{n_0 P}{c} T^2 R_2 \times \frac{\cos \alpha - R_1 R_2 \cos(\alpha - 2\beta)}{1 + R_1^2 R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos 2\beta} \cos \gamma_m \quad (1)$$

$$F_z = \frac{n_0 P}{c} R_1 \sin 2\theta + \frac{n_0 P}{c} T^2 R_2 \times \frac{\sin \alpha - R_1 R_2 \sin(\alpha - 2\beta)}{1 + R_1^2 R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos 2\beta} \sin \gamma_m \quad (2)$$

式中: p 为单光线激光束功率; R_1 为壳层表面的菲涅耳反射系数; R_2 为壳层与金属核交界面的菲涅耳反射系数; θ 为单光线在微球表面的入射角; c 为真空中的光速; n_0 为微球周围溶液的折射率; α 为第一条折射出微球的光线与入射光线之间的夹角; β 为相邻两条折射光线之间的夹角的一半; γ_m 为单光线与 Z 轴方向的夹角。

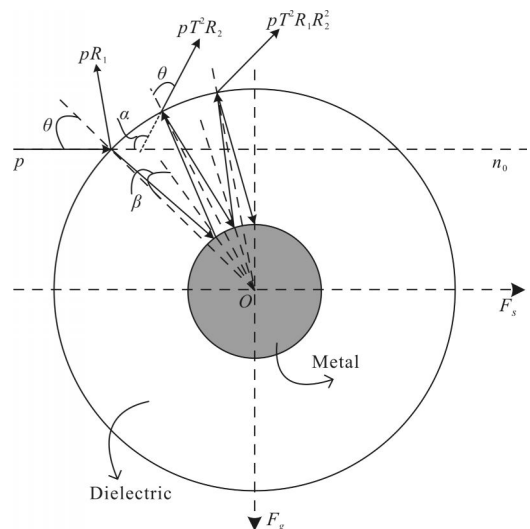


图 1 单光束照射表面包覆一层介质的金属微球的几何光路^[20]
Fig.1 Geometry of a single incident ray striking a metallic microsphere coated with a layer of dielectric^[20]

通常,用一个无量纲的量 Q (捕获效率)来表示聚焦光束与微粒之间的相互作用力, Q 定义为 $Q = Fc / (n_0 P)$ ^[3],其中 F 是捕获力, c 是真空中的光速, P 是聚焦光束总的功率。一个高数值孔径的油浸物镜用来对波长为 532 nm、偏振方向沿 X 轴的激光束进行聚焦,研究对象分别为 Cu(核)/PS(壳)及 Cu(核)/CuO(壳)核壳结构微球,Cu 的复折射率为 $1.12 + 2.6i$ (光波长为 532 nm)^[21],聚苯乙烯及氧化铜的折射率分别为 1.57、2.6。微球处在 Z 轴上,激光焦点位于微球的上方且距离微球中心 O 的距离为 z_0 。当激光焦点在微

球中心上方时定义 z_0 为正,反之 z_0 为负(正负只代表激光焦点相对微球中心的位置)。根据参考文献[3],对方程(1)(2)进行积分可得到聚焦光束对微球的散射力和梯度力。设包覆介质的金属微球壳层的厚度为 h ,微球的半径为 R 。选表面包覆较厚 PS 层的 Cu 微球作为研究对象,微球的半径 R 归一化为 1,其他单位量归一化为 R ,设定介质壳层的厚度为 $0.8R$ 。基于参考文献[20],得到该微球在聚焦光场中的受力随 z_0 的变化关系如图 2 所示。 Q_s 、 Q_g 、 Q 分别代表表面包覆较厚 PS 壳的金属微球所受到的轴向散射力、梯度力及合力。

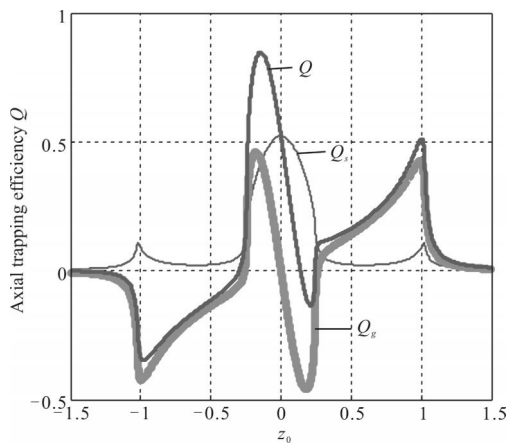


图 2 表面包覆较厚聚苯乙烯的铜微球轴向捕获效率 Q_s 、 Q_g 、 Q 随 z_0 的变化曲线

Fig.2 Axial trapping efficiency Q_s , Q_g , Q as a function of the axial position z_0 for the Cu microsphere coated with a thick PS layer

图 2 中,不管激光焦点是在微球上方还是下方,聚焦光束对微球的散射力均为正,但梯度力随微球所处位置的不同变化比较明显。当激光焦点刚好与微球中心重合时,表面包覆较厚介质层的金属微球受到的散射力最大,梯度力为 0,但是纯介质微球所受的散射力接近 0^[3]。当激光焦点处在微球上方时,其轴向捕获效率为正,对微球表现出来沿 Z 正方向的排斥力,此时微球在辐射力作用下沿 Z 轴正向运动,焦点距离微球中心的距离 z_0 越来越小,直到 z_0 约为 $0.25R$ 时,微球所受到的梯度力与散射力达到平衡。由于惯性微球会继续沿 Z 正方向运动,随着 z_0 继续减小,梯度力对微球的作用凸显,合力沿 Z 轴负方向,微球在力的作用下沿 Z 负方向运动,焦点距离微球中心的距离 z_0 开始变大直到 z_0 约为 $0.25R$ 。微球在力的作用下围绕平衡位置往复运动多次,最终

当微球处在激光焦点下方且距离约为 $0.25R$ 时,该微球被稳定地捕获。同理,当 z_0 约为 $-0.3R$ (负号代表微球位于激光焦点上方)时微球被稳定捕获。模拟结果表明,不同于纯金属微球,在金属微球表层覆盖一层较厚介质层能够有效地实现捕获;不同于介质微球,表面包覆介质层的金属微球不仅能够在激光焦点的上方也可以在激光焦点的下方被捕获,但不能在强度较大的焦点区域被捕获。由于氧化铜的折射率较大,单独考虑表层覆盖较厚氧化铜介质层的铜微球在聚焦光场中的受力情况,如图 3 所示。当激光焦点位于微球下方的距离大于 R 时,微球会被排斥开,不会被捕获,因此 $z_0 = -R$ 的位置不是稳定的平衡点。同理当激光焦点位于微球下方距离约 $0.45R$ 或者激光焦点位于微球上方距离约 $0.4R$ 时,微球能够被稳定捕获。结果显示壳层较厚且折射率较大时,核壳结构金属微球表现出不同的捕获特性。

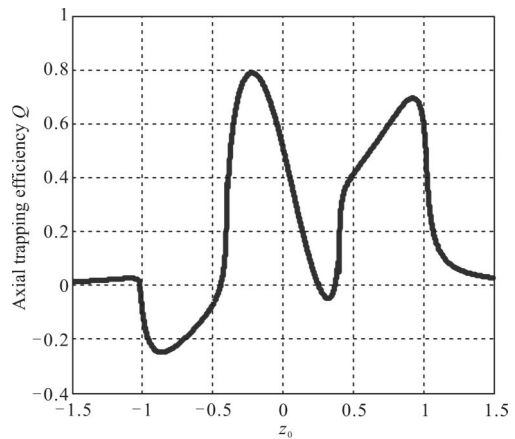


图 3 Cu(核)/CuO(壳)核壳结构微球的轴向捕获效率 Q 随 z_0 的变化情况

Fig.3 Axial trapping efficiency as a function of the axial position z_0 for the Cu microsphere coated by the CuO

另外,选取 Cu(核)/PS(壳)核壳结构微球作为研究对象,微球相对激光焦点位置固定时,改变微球壳层的厚度并计算在该位置处不同壳层厚度的微球所受到轴向捕获效率,得到轴向捕获效率与介质壳层厚度之间的关系。当激光焦点位于 Cu(核)/PS(壳)金属微球上方 $0.05R$ 、 $0.1R$ 、 $0.3R$ 、 $0.5R$ 时,其所受到的辐射力分别随壳层厚度的变化情况如图 4 所示。当壳层厚度较薄的时候,聚焦光束对微球均表现出排斥作用,随着壳层慢慢变厚,排斥力作用明显减弱直

到梯度力与散射力达到力学平衡。对应上述不同位置,当介质壳层的厚度分别约为 $0.625R$ 、 $0.798R$ 、 $0.957R$ 、 $0.989R$ 时,微球能被捕获。很明显 Cu(核)/PS(壳)核壳结构微球的壳层厚度越厚,其被捕获时距离焦点的位置越近,当壳层的厚度接近 R 的时候,或者说该微球变成一个纯聚苯乙烯微球的时候,其被捕获时基本是处于光束焦点位置处。根据参考文献[3]中的几何光学模型,当光束焦点位于纯聚苯乙烯小球下方 $0.02R$ 时,介质球被稳定捕获,这点较好地支持了参考文献[20]中的几何光学模型。

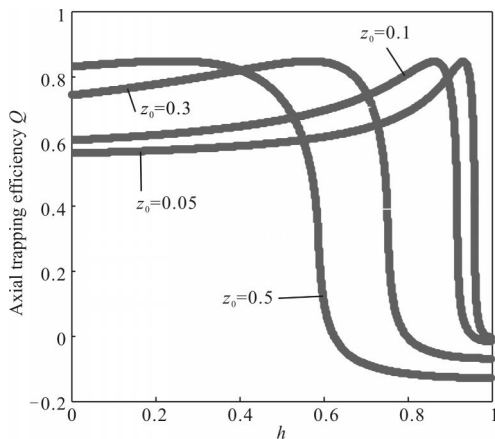


图 4 不同 z_0 处,微球轴向捕获效率 Q 随微球壳层厚度的变化情况

Fig.4 Axial trapping efficiency as a function of the thickness of the shell for different z_0

2 实验分析

为了对以上的理论结果进行简单验证,选取比较常见的 Cu 微球作为研究对象。利用化学方法制备的金属铜微球表面会吸附有一层聚合物,经过离心和超声处理最大限度去除表面的聚合物,过一段时间进行透射电镜(TEM)、X 射线光电子能谱(XPS)分析,结果显示 Cu 微球表面已经被氧化且氧化程度较高,将这些直径大概 $2 \mu\text{m}$ 、壳层厚度大概 500 nm 的 Cu 微球悬浮在去离子水中并制作好样品标本。图 5 是简易光镊平台,图中 1 为相干公司 Genesis MX 系列半导体激光器(TEM_{00} 模),其出射激光波长为 532 nm ,最大功率为 1 W 且功率连续可调;2 是超高分辨 CCD,用来对操作粒子的过程进行录像或者拍照;3 是二向色镜,对 532 nm 的激光全反并能允许照明灯光透过便于观察粒子动态;4 是 $100\times$ 高数值孔径油

浸物镜,用来对入射激光束进行聚焦。

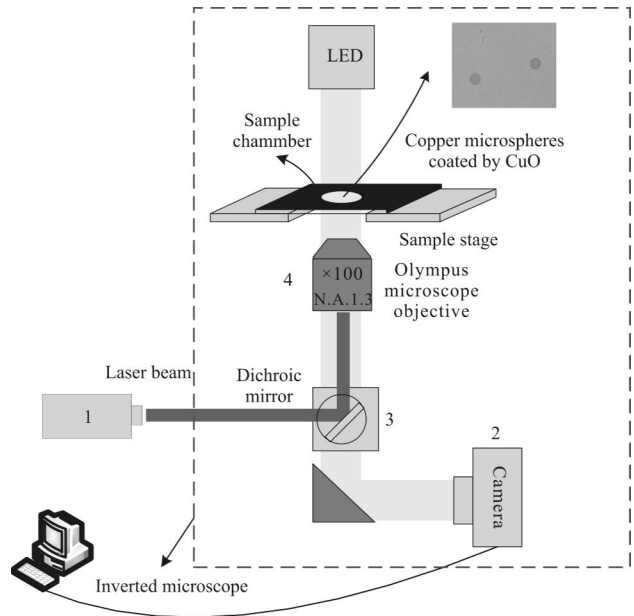


图 5 光镊装置

Fig.5 Schematic setup of optical tweezers system

实验过程中,调节物镜微调旋钮使得激光焦点位于微粒上方,然后使激光焦点缓慢向下移动,能够看到被氧化的铜微球被吸到光强稍强的地方。图 6 (a)~(d) 是在捕获微球过程中截取的连续四帧图片,高斯光聚焦光斑位于曝光区域左下角(虚线圆圈标

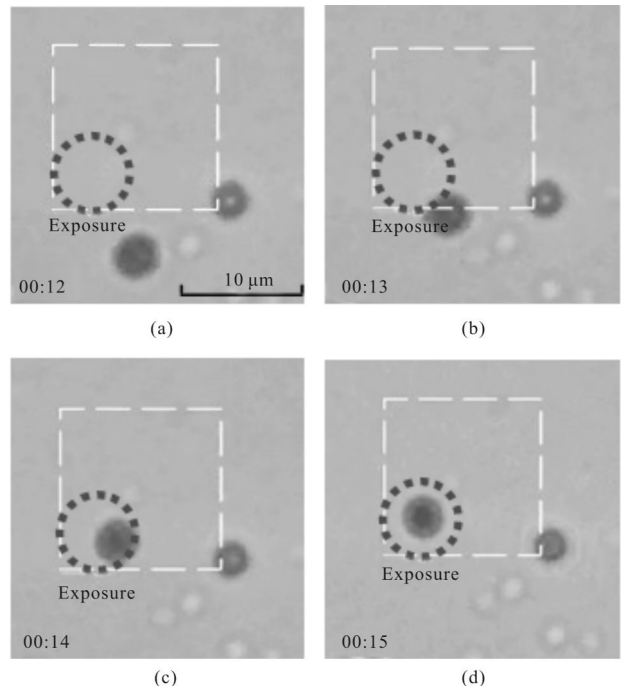


图 6 四帧图片显示微球被捕获

Fig.6 Four sequential frames shows that a microsphere was trapped

示),从四帧图片中可以很清楚看到,当该微球在光斑附近时能被吸引到光场中,由于捕获位置光强较弱捕获不是特别稳定。依据上文模拟结果,包裹氧化铜的铜微球能够被捕获在焦点的下方,即被捕获在光强稍弱的地方,因此其受到的辐射力也相对较小。图 7 展示了微球被捕获的同时实现了水平移动,用三角形标记的粒子是参照粒子,操作过程中一直保持静止。许多科研组利用特殊光束实现捕获金属微粒,例如 K. Sakai 等人^[22]利用 LG 光束将金属粒子捕获到涡旋光束的中心暗斑中,其捕获条件比较苛刻且较难实现。不同于纯金属微球在聚焦光场中的捕获特性,文中实验证实表面包覆较厚介质层的金属微球能够被聚焦的高斯光束捕获且操作起来相对较容易。理论和实验结果表明,该类型金属微球具有不同于纯金属球和介质球的捕获特性,其捕获位置不仅与壳层的材料有关而且与壳层的厚度有关。

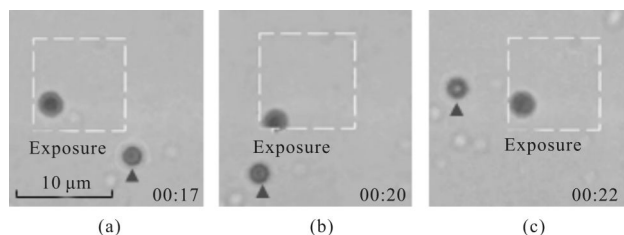


图 7 移动被捕获微球

Fig. 7 Optical manipulation of the trapped microsphere

3 结论

文中基于核(金属)/壳(介质)微球单光束梯度阱力学模型研究了 Cu(核)/PS(壳)及 Cu(核)/CuO(壳)核壳结构微球在聚焦光场中的轴向捕获力与位置、壳层厚度之间的关系。理论与实验结果显示,表面包覆一层较厚介质的金属微球较容易被捕获且捕获条件不同于纯介质球与金属微球。选取表层被氧化的 Cu 微球进行光学微操作实验,实验结果证实该类型微球能够被捕获且能够在平面内移动。基于理论和实验结果,能够利用光镊对金属粒子、介质粒子、核壳结构粒子进行分选,实现对特定金属粒子体系的表面等离子体共振特性的研究,进一步扩展光镊技术的应用范围。

参考文献:

[1] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*,

2003, 424: 810–816.

[2] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676–680. (in Chinese)

田秀芹,肖思,陶少华,等.飞秒超短脉冲激光对硅太阳能电池的损伤阈值研究[J].*红外与激光工程*,2014,43(3):676–680.

[3] Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime [J]. *J Biophys*, 1992, 61(2): 569–582.

[4] Moffitt J R, Chemla Y R, Smith S B, et al. Recent advances in optical tweezers [J]. *Annu Rev Biochem*, 77(1): 205–228.

[5] Pang Y J, Gordon R. Optical trapping of a single protein[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(1): 402–406.

[6] Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, et al. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers [J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 1768.

[7] Padgett M, Di Leonardo R. Holographic optical tweezers and their relevance to lab on chip devices [J]. *Lab Chip*, 2011, 11(7): 1196–1205.

[8] Yan Shubin, Zhao Yu, Yang Dechao, et al. Optical tweezers based on near-field optical theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1034–1041. (in Chinese)

闫树斌,赵宇,杨德超,等.基于近场光学理论光镊的研究进展[J].*红外与激光工程*,2015,44(3):1034–1041.

[9] Ma Liang, Wu Fengtie. New combined positive axicon for generating bottle beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1988–1991. (in Chinese)

马亮,吴逢铁.新型组合正轴棱锥产生局域空心光束[J].*红外与激光工程*,2011,40(10):1988–1991.

[10] Li J, Wu X P. FDTD simulation of trapping nanowires with linearly polarized and radially polarized optical tweezers [J]. *Opt Express*, 2011, 19(21): 20736–20742.

[11] Zakharian A R, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-beam trapping of micro-beads in polarized light: numerical simulations [J]. *Opt Express*, 2006, 14(8): 3660–3676.

[12] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11(4): 1491–1499.

[13] Mishchenko M I. Light scattering by randomly oriented axially symmetric particles [J]. *J Opt Soc Am A*, 1991, 8(6): 871–882.

[14] Nieminen T A, Rubinsztein-Dunlop H, Heckenberg N R, et al.

- Numerical modelling of optical trapping [J]. *Comput Phys Commun*, 1994, 142(1-3): 468-471.
- [15] Saija R, Denti P, Borghese F, et al. Optical trapping calculations for metal nanoparticles comparison with experimental data for Au and Ag spheres [J]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 10231-10241.
- [16] Ng J, Lin Z F, Chan C T, et al. Photonic clusters formed by dielectric microspheres: Numerical simulations [J]. *Phys Rev B*, 2005, 72(8): 085130.
- [17] Ke P C, Gu M. Characterization of trapping force on metallic Mie particles[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(1): 160-167.
- [18] Zhang L, Blom D A, Wang H. Au -Cu₂O core-shell nanoparticles: A hybrid metal-semiconductor heteronanostructure with geometrically tunable optical properties [J]. *Chem Mater*, 2011, 23(20): 4587-4598.
- [19] Lu Y, Yin Y D, Li Z Y, et al. Synthesis and self-assembly of Au@SiO₂ core-shell colloids [J]. *Nano Lett*, 2002, 2(7): 785-788.
- [20] Shubo Cheng, Shaohua Tao, Conghua Zhou, et al. Optical trapping of a dielectric-covered metallic microsphere [J]. *J Opt*, 2015, 17: 105613.
- [21] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. New York: Academic Press, 1985.
- [22] Sakai K, Noda S. Optical trapping of metal particles in doughnut-shaped beam emitted by photonic-crystal laser [J]. *Electron Lett*, 2007, 43(2): 107-108.