

光镊中轴向光阱力的研究

王于刚,徐建波,吴福燕,张敏,窦会庆,李杰
(山东师范大学物理与电子科学学院,山东 济南 250014)

摘要:基于几何光学原理,对微粒直径远大于激光波长的米氏球状微粒所受的轴向力进行了计算,根据计算结果讨论了轴向力与激光光束波长、束腰半径、光束功率、微粒半径、折射率等参数的关系。

关键词:光镊;轴向力;微操纵

中图分类号: O439 **文献标识码:** A

Study on the Axial Force in Optical Tweezers

WANG Yu-gang, XIU Jian-bo, WU Fu-yan, ZHANG Min, DOU Hui-qing, LI Jie
(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: The axial optical force exerted on the Mie micro-sphere particles is calculated quantitatively based on the theory of geometrical optics. According to the calculation results, the relationship between the axial force and some parameters, including laser wave-length, beam waist, laser power, radius of the particle, refractive index and so on, are discussed.

Key words: optical tweezers; the axial force; micromanipulation

1 引言

由于激光具有极高的能量密度,当激光照射到微小物体上时对微小物体的力将不能被忽略,同时用激光操纵微小物体具有非机械接触性、无损伤性操作等特点,所以,在激光出现以后,人们利用光压原理来操纵微小物体的研究得到迅速发展^[1]。1970年,美国 Bell 实验室的 Ashkin^[2] 首先提出,可以利用激光光束产生的辐射压力影响可透光的微米尺度中性微粒的动力学特性;并且在实验上用一束 TEM₀₀ Gauss 光束在垂直于光传播方向上成功束缚了水中的乳胶微粒,奠定了光镊研究的基础。1978年, Ashkin 再次提出另一种单光束势阱的设想^[3],并于 1986 年,把单束激光引入到高数值孔径的显微物镜上形成三维光学势阱,并从实验上证实了这种光学势阱可以对水中粒径在 25nm ~ 10μm 的活体物质进行无损伤地操纵^[4];人们所说的光镊即是这

样一种三维的光学势阱。光镊的发明使人类对微观世界的认识活动从被动的观察转为主动的操纵,光镊技术在生物学、医学、化学、物理学等很多研究领域发挥着越来越重要的作用。

本文利用几何光学原理,对微粒尺寸远大于光波长的米氏球状粒子所受轴向力进行了分析和计算,并根据计算结果,讨论了当光束束腰半径、光束波长、功率、微粒半径、折射率中的任一个参量和微粒到光束束腰中心的距离同时变化时与轴向力的关系,为实验中参数的选择提供了依据。

2 基本理论

把理想化的均匀透明介质小球放在一束极细的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60678027)。

作者简介:王于刚(1983-),男,硕士,主要从事光学微操纵研究。E-mail: qwe194910@163.com

收稿日期:2007-09-06

高斯光束中,且小球的球心在光束的光轴上,光束将会在介质球表面发生反射、折射,并在球体中不断发射、折射,如图1所示,高斯光束用发散球面模型来处理, ω_0 为聚焦高斯光束束腰半径, $R(z)$ 为光束波面曲率半径, A_0 为发散球面波的曲率中心, z_0 为光腰到球心的距离, i, γ 分别为入射角和折射角, n_1, n_2 分别为周围介质的折射率和小球的折射率, ρ 为微粒半径, φ, θ 为球坐标积分角。

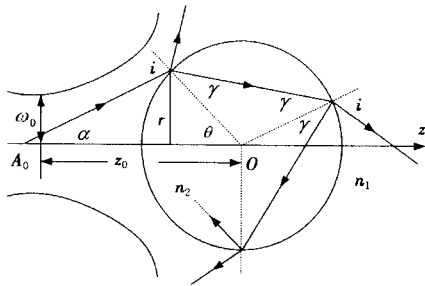


图1 单个光线在微粒小球上的传播光路图

Fig.1 the propagation of a single ray on the micro-sphere

对单色自然偏振基模高斯光束,在球表面菲涅耳反射系数 R 与透射系数 T 分别为:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i - \gamma)}{\sin^2(i + \gamma)} + \frac{\tan^2(i - \gamma)}{\tan^2(i + \gamma)} \right], T = 1 - R$$

忽略微粒对光的吸收,利用单光线追踪法得到微粒在轴向所受的合力为^[5-6]:

$$F(z) = \frac{n_1^2 \rho^2}{2\mu_0 c^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_m} d\theta E^2 \sin\theta \cos i \left[\cos\alpha + R \cos(i + \theta) - T^2 \frac{\cos(i + \theta - 2\gamma) + R \cos(i + \theta)}{1 + R^2 + 2R \cos(2\gamma)} \right]$$

根据图1,可以得到:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

$$\sin\alpha = \frac{r}{R(z)}, r = \rho \sin\theta$$

$$E^2(x, z) = E_0^2 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega^2(z)}\right)$$

$$z = z_0 - \rho \cos\theta, n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma$$

其中, E 为激光高斯光束 z 处的电场强度; μ_0 为真空中的磁导率; c 为真空中的光速; λ 为激光高斯光束波长。在以往的计算中对 θ 的积分上限常看成是 $\pi/2$,但实际上 θ 的积分上限不是 $\pi/2$,而是会随着光束束腰半径、微粒尺寸、束腰到微粒小球距离的变

化而变化,比 $\pi/2$ 略小的一个数值^[7]。

3 计算结果与分析

根据上面所得轴向力的公式,对轴向力在不同参数情况下的大小分别进行了计算。当束腰半径 $\omega_0 = 0.5 \mu\text{m}$,折射率 $n_2 = 1.4$,小球半径 $\rho = 5 \mu\text{m}$,激光功率 $P_0 = 100\text{mW}$ 时,高斯光束的波长、微粒到光束中心的距离 z_0 和轴向力的关系如图2所示。从图中可以看出,微粒所受的轴向力随激光波长的变化而变化;在现在所出现的激光器中,并不能得到任意波长的光束,而是只能得到某些特定波长的光束,因此在实验中应当根据实验条件选择合适波长的光束来操纵微小物体。

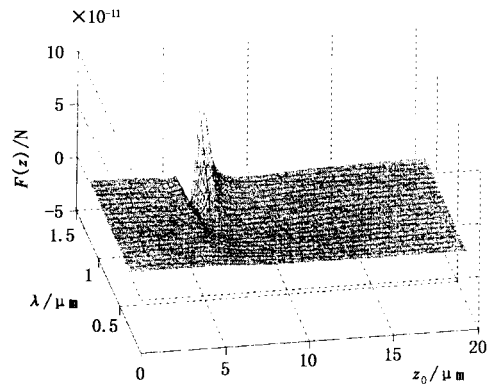


图2 轴向力与波长、距离的关系

Fig.2 the relationship of the axial force, λ and z_0

当波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,其他参数和图2相同时,高斯光束束腰半径、微粒到光束中心的距离 z_0 和轴向力的关系如图3所示。从图中可以看出,在所选的光束束腰半径范围内,当光束束腰半径小时,产生的势阱陡且深;随着光束束腰半径的增大,产生的势阱变的平缓且浅;并且当束腰半径增大到一定程度时,就不能产生势阱,即在轴向方向上不能嵌住微粒。

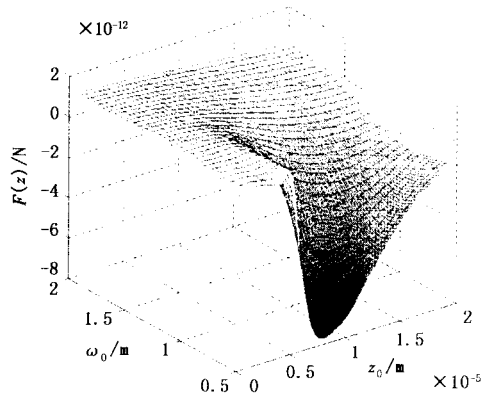


图3 轴向力与光束束腰半径、距离的关系

Fig.3 the relationship of the axial force, ω_0 and z_0

当波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,其他参数和图 2 相同时,微粒小球的折射率、微粒到光束中心的距离 z_0 和轴向力的关系如图 4 所示。从图中可以看出,在所选的微粒折射率变化范围内,当微粒的折射率比较小(大于周围介质的折射率)时,产生的势阱浅;当折射率增大时,势阱开始变深,且势阱深度随折射率的变化而变化;当折射率增大到一定程度时,折射率对势阱深度的影响不太明显。

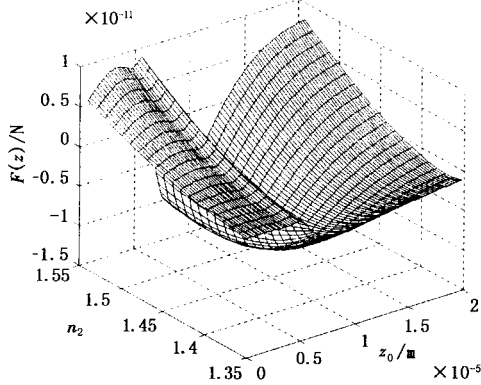


图 4 轴向力与微粒折射率、距离的关系

Fig.4 the relationship of the axial force, n_2 and z_0

当波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,其他参数和图 2 相同时,微粒小球的半径、微粒到光束中心的距离 z_0 和轴向力的关系如图 5 所示。从图中可以看出,微粒半径比较小时,产生的势阱浅;随着微粒半径的增大,产生的势阱变深,产生势阱处离光束束腰的距离随微粒半径的增大而变远,当微粒半径增大到一定程度时,势阱最深处轴向力随微粒半径的变化不明显。

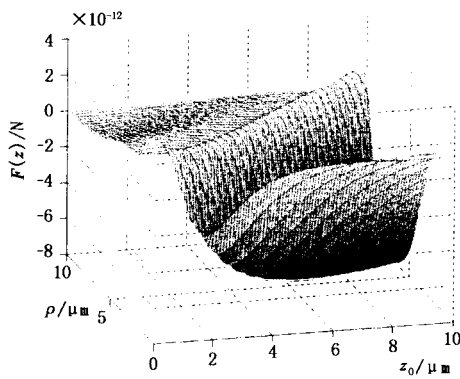


图 5 轴向力与微粒半径、距离的关系

Fig.5 the relationship of the axial force, ρ and z_0

当波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,其他参数和图 2 相同时,光束功率、微粒到光束中心的距离 z_0 和轴向力的关系如图 6 所示。从图中可以看出,当功率小时,势阱浅;功率增大时,势阱深,且势阱最深处轴向力随着功率的增大而均匀地变化,功率对产生势阱的

位置影响不明显。在实际的操作过程中,增大功率可能对生物微粒造成损伤。因此,在实验中,应当根据研究对象选择合适功率的激光光束操纵微粒。

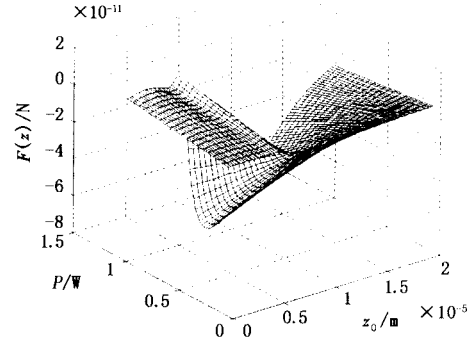


图 6 轴向力与光束功率、距离的关系

Fig.6 the relationship of the axial force, P and z_0

4 结论

利用几何光学原理,对微粒尺寸远大于光束波长的介质小球所受的轴向力进行了计算,计算结果给出了当两个参数同时变化时,微粒所受轴向力的变化关系,并进行了分析,分析结果得出了激光光束波长、光束束腰半径、光束功率、介质球的折射率、半径都会对轴向力有影响。这对于在实际操纵微小物体时,根据实验对象选择适当的参数提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] David G Grier. A revolution in optical manipulation[J]. Nature,2003,424:810 - 816.
- [2] A Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. Phy. Rev. Lett. ,1970,24(4) :156 - 159.
- [3] A Ashkin. Trapping of atoms by resonance radiation pressure[J]. Phy. Rev. Lett. ,1978,40(12) :729 - 732.
- [4] A Ashkin, 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.
- [5] 韩正甫,郭光灿. 粒子在单束激光势阱中的束缚力[J]. 中国激光,1992,19(7) :517 - 522.
- [6] 谈爱玲,赵勇,史锦珊. 基于 MATLAB 的单光阱光镊中光阱力的分析[J]. 激光技术,2004,28(4) :373 - 375, 400.
- [7] Shojiro Nemoto, Hiroyoshi Togo. Axial force acting on a dielectric sphere in a focused laser beam[J]. Appl. Opt. , 1998,37(27) :6386 - 6394.