

部分相干径向偏振光束对两种粒子的捕获

田 博 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 研究了部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后,在聚焦区域内,对于瑞利粒子(半径小于波长)产生的辐射力的分布情况。基于 Collins 公式,推导了部分相干径向偏振光通过透镜聚焦后,在几何焦平面附近的光强表达式,并应用瑞利散射理论,计算了聚焦光束与瑞利粒子的相互作用力。根据数值模拟的结果,比较了部分相干径向偏振光束与部分相干线偏振光束经透镜聚焦后辐射力的分布情况。并且经过研究发现,通过改变部分相干径向偏振光的相干度,在几何焦平面内的辐射力有着明显的变化,且利用部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后焦平面内辐射力的变化特性,能同时对高折射率粒子和低折射率粒子进行捕获。

关键词 非线性光学;部分相干径向偏振;辐射力;Collins 公式;瑞利散射理论

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s102006

Trapping Two Types of Particles Using a Partially Coherent Radially Polarized Doughnut Beam

Tian Bo Pu Jixiong

(Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract The radiation force of focused partially coherent radially polarized doughnut beam acting on a particle ($r < \lambda$) in the Rayleigh scattering regime is theoretically studied. Based on the Collins formula, expressions of intensity distribution in the focal region are derived, and the interaction forces between light and the Rayleigh particle are calculated using the Rayleigh scattering theory. Numerical calculations are shown to compare the different radiation forces of a partially coherent radially polarized doughnut beam and a partially coherent linear polarized beam. It is found that the radiation forces in the focal field are obviously different with the different correlation widths, and the particles whose refractive index is lower or higher than the ambient can simultaneously be trapped by use of focused partially coherent radially polarized doughnut beams.

Key words nonlinear optics; partially coherent radially polarized doughnut beams; radiation force; Collins formula; Rayleigh scattering theory

OCIS codes 140.7010; 260.5430; 030.1640

1 引 言

研究表明,光在物体表面和内部发生的各种现象将会引起光子速度和光子动量的变化,光辐射压力就是由于光子动量的变化而产生的。1970年,美国 Bell 实验室的 Ashkin^[1] 首先提出利用激光光束产生的光辐射压力可以影响可透光的微米尺度中性

微粒的动量。1986年, Ashkin 等^[2] 又利用单光束聚焦的激光在焦点附近形成三维光学势阱,这个三维光学势阱被称为“光镊”^[3]。此后,光镊技术被广泛应用于物理化学、生物、化学等领域。

近年来,已有不少学者对各类光束产生的光阱力做了大量的研究^[4~11]。然而,到目前为止,对于

收稿日期: 2011-07-10; 收到修改稿日期: 2011-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)、中国科学院瞬态光学与光子技术国家重点实验室基金(SKLST200912)资助课题。

作者简介: 田 博(1986—),女,硕士研究生,主要从事光束传输与变换方面的研究。E-mail: tianbo@hqu.edu.cn

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光束传输与非线性光学等方面的研究。

E-mail: jixiong@hqu.edu.cn(通信联系人)

部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后,在瑞利粒子(半径小于波长)上产生的辐射力在聚焦区域内的分布情况还没有系统的研究。本文推导了部分相干径向偏振光通过透镜聚焦后,在几何焦平面附近的光阱力计算公式,比较了部分相干径向偏振光束与部分相干线偏振光束经透镜聚焦后辐射力的分布情况,研究了相干度对瑞利粒子的光阱力的影响,通过改变相干度的大小,部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后同时对两种粒子进行捕获。

2 理论分析

如图 1 所示,部分相干径向偏振光束被焦距为 f 的透镜聚焦,设透镜位于 $z=0$ 处,透镜平面部分相干径向偏振光束的交叉谱密度函数^[12]为

$$W_{\alpha\beta}(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{2I_0}{\omega^2} \alpha_1 \beta_2 \times \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{\omega^2}\right) \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{\delta_{\alpha\beta}^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y_1 - y_2)^2}{\delta_{\alpha\beta}^2}\right] \quad (\alpha, \beta = x, y) \quad (1)$$

式中 ω 为入射光束的束腰宽度, $\delta_{\alpha\beta}$ 为原光束的互相干长度($\alpha \neq \beta$) 或自相干长度($\alpha = \beta$)。 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 是 $z=0$ 平面上两点的坐标。根据 Collins 公式,在 $z>0$ 平面,部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后的光强^[13]

$$I(x, y, z) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iiint \iiint w_{\alpha\beta}(x_1, y_1, x_2, y_2) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}\{A[(x_1^2 + y_1^2) - (x_2^2 + y_2^2)] - 2x(x_1 - x_2) - 2y(y_1 - y_2)\}\right\} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (2)$$

式中 $k = \frac{2\pi n_m}{\lambda}$ 为波数, (x, y) 是聚焦区域内点的横坐标,对于本透镜系统的变换矩阵元 A, B, C, D 为

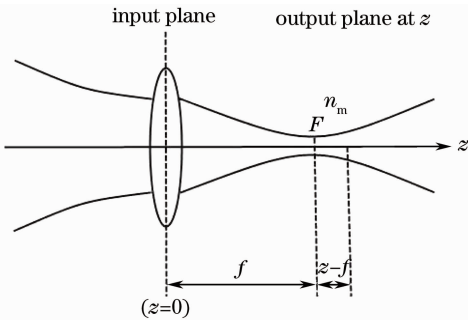


图 1 部分相干径向偏振基模拉盖尔-高斯光传输示意图
Fig. 1 Scheme of focusing system of partially coherent radially polarized doughnut beam

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{z}{f} & z \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

把(1),(3)式代入(2)式,使用积分公式^[14]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (ax^2 + bx + c) \exp(-p^2 x^2 \pm qx) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{p} \left[\frac{a}{2p^2} \left(1 + \frac{q^2}{2p^2}\right) + \frac{bq}{2p^2} + c \right] \exp\left(\frac{q^2}{4p^2}\right), \quad (4)$$

可以得出

$$I(x, y, z) = \frac{8z^2 I}{k^2 \omega^2 \theta^2} \left\{ \frac{1}{\delta^2} + \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \times \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2\right] (x^2 + y^2) / (\theta^4 w^4) \right\} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2 \theta}\right], \quad (5)$$

式中 $\theta = \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 \left(1 + \frac{2\omega^2}{\delta^2}\right) + \left(1 - \frac{z}{f}\right)^2$, $z_0 = \frac{k\omega^2}{2}$, $\lambda = \frac{\lambda_0}{n_m}$, z_0 为部分相干径向偏振光束的瑞利长度, δ 为自相干长度($\alpha = \beta$), n_m 为光传输介质的折射率, λ_0 为入射光波长, λ 为入射光在折射率是 n_m 的介质中的波长, f 为透镜的焦距。

以瑞利粒子 ($a < \frac{\lambda}{20}$) 为受力对象,设粒子为球型绝缘粒子,在光场中受到梯度力和散射力的作用。基于瑞利散射理论,把粒子看成一个点偶极子,且粒子折射率为 n_p ,则粒子所受散射力和梯度力为^[15]

$$F_{\text{Scat}}(x, y, z) = e_z n_m \alpha \frac{I(x, y, z)}{c}, \quad (6)$$

$$F_{\text{Grad}} = 2\pi n_m \beta \frac{\nabla I(x, y, z)}{c}, \quad (7)$$

式中 $\alpha = \left(\frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4}\right) \left[\frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)}\right]^2$, $\beta = a^3 \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)}$, a 为粒子的半径, n_p 为粒子的折射率, $m = \frac{n_p}{n_m}$ 。

3 数值计算与讨论

这部分讨论了部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后,在聚焦区域内,对于瑞利粒子产生的辐射力的分布情况。所有计算中所选参数为:激光光束真空中波长 $\lambda_0 = 0.5415 \mu\text{m}$,在水溶液中,介质折射率 $n_m = 1.332$,选取粒子的折射率为 $n_p = 1.592$,其他参数选为: $I_0 = 200 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, $\omega = 2 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ cm}$ 。图 2 所示为部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后,在聚焦区域内,相干度 δ 的变化对于 $a = 10 \text{ nm}$ 的瑞

利粒子所受的辐射力的影响。

由图 2 可以看出当 $\delta=5w$ 时,在焦平面上可以稳定捕获低折射率粒子。随着相干度 δ 的减小,可以看出横向梯度力 $F_{\text{Grad},x}$ 、轴向梯度力 $F_{\text{Grad},z}$ 和散射

力 F_{Scat} 迅速地减小,并且在焦平面上捕获的粒子类型也发生变化。当相干度减小到一定程度时,在焦平面内可以稳定捕获高折射率粒子。因此,可以通过改变相干度的大小,来捕获不同类型的粒子。

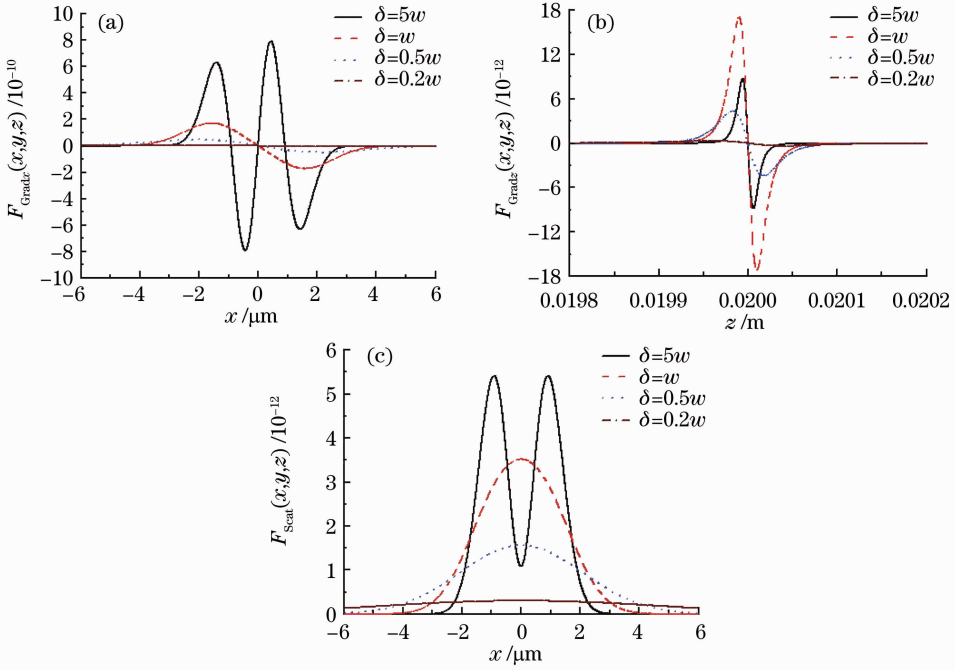


图 2 相干度 δ 的变化对(a)横向梯度力 $F_{\text{Grad},x}$ 、(b)轴向梯度力 $F_{\text{Grad},z}$ 和(c)散射力 F_{Scat} 的影响

Fig. 2 Influence of varying δ on (a) $F_{\text{Grad},x}$, (b) $F_{\text{Grad},z}$ and (c) F_{Scat}

图 3 为聚焦后不同相干度 δ ,辐射力 $F_{\text{Scat}} + F_{\text{Grad},z}$ 沿 z 轴的分布。由图 3 可以看出随着 δ 的减小,沿着 z 轴稳定平衡的区域逐渐减小,并当 δ 取一

定值的情况下,稳定平衡的区域完全消失。在图 3(d)中可以看出,沿着 z 轴的辐射力中,散射力占主要部分,因此粒子将沿着 z 轴加速,此时不能稳

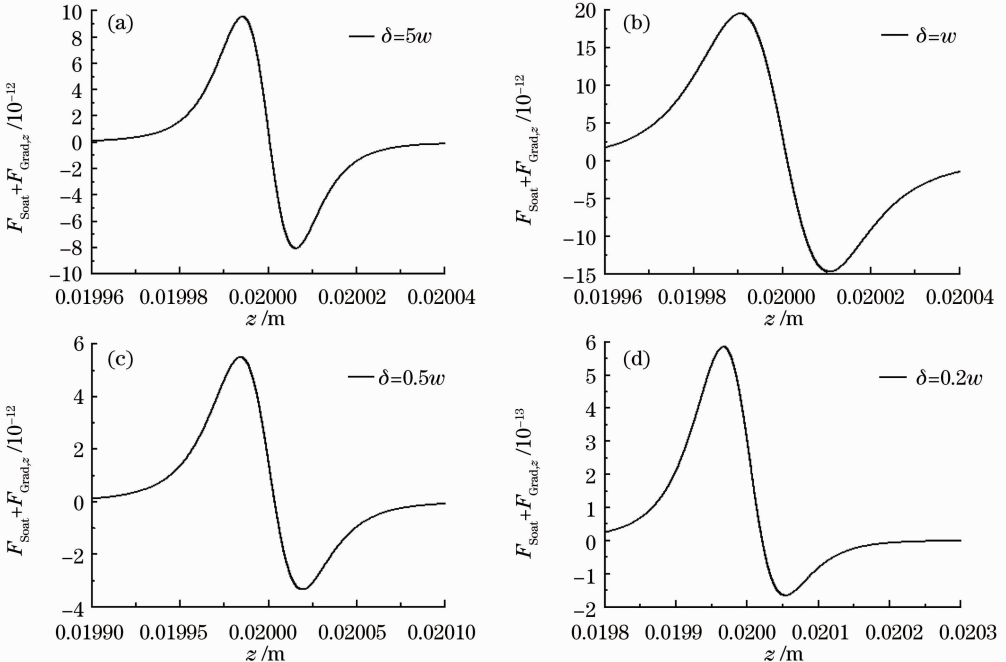


图 3 不同相干度 δ 下辐射力 $F_{\text{Scat}} + F_{\text{Grad},z}$ 沿 z 轴的分布

Fig. 3 Changes of the radiation forces $F_{\text{Scat}} + F_{\text{Grad},z}$ on the z axis for different δ

定地捕获粒子。沿 z 轴辐射力为零的点即平衡点并不在几何焦点,它随着相干度 δ 的变小逐渐地沿 z 轴移动。因此,可以通过控制相干度 δ 的大小,来控制辐射力稳定平衡的区域,并能控制稳定捕获粒子的位置,这对于更好地实现粒子的囚禁和移动有着重要的意义。

部分相干径向偏振光束和部分相干线偏振光束经透镜聚焦后,散射力与梯度力相比较如图 4 所示。可以看出,部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后所产生的散射力和梯度力均小于部分相干线偏振光束。另外,当相干度 $\delta=0.5\omega$ 时,两种光束均可稳定捕获高折射率粒子。

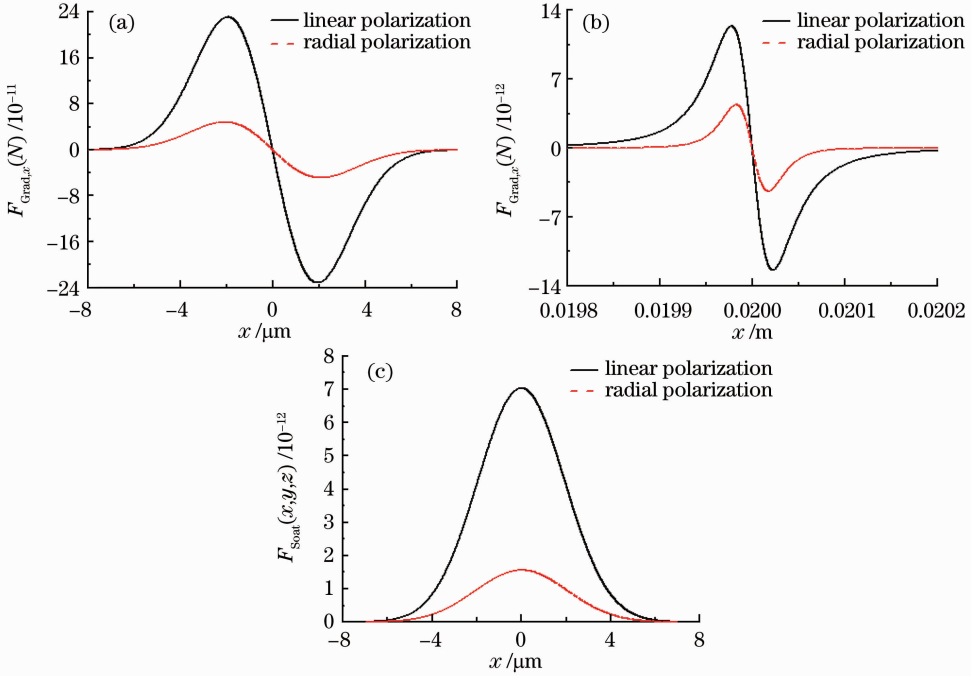


图 4 部分相干径向偏振和部分相干线偏振的(a)横向梯度力 $F_{\text{Grad},x}$, (b)轴向梯度力 $F_{\text{Grad},z}$ 和(c)散射力 F_{Scat} 的比较。

其他参数选为 $\delta=0.5\omega$

Fig. 4 Comparison of gradient forces in transverse and axial directions and scattering forces for the radially polarized partially coherent and linearly polarized partially coherent beams. (a) $F_{\text{Grad},x}$; (b) $F_{\text{Grad},z}$; (c) F_{Scat} , the other parameters are chosen as $\delta=0.5\omega$

4 结 论

利用 Collins 公式,推导了部分相干径向偏振光通过透镜聚焦后,在几何焦平面附近的光强表达式,并且应用瑞利散射理论,数值计算分析了在相干度 δ 不同的情况下,聚焦区域辐射力的分布情况。研究表明,通过控制相干度 δ 的取值,部分相干径向偏振光束经透镜聚焦后,可以同时高折射率粒子和低折射率粒子进行捕获。并且随着相干度 δ 的减小,稳定平衡区域逐渐减小,当 δ 取一定值的情况下,稳定平衡的区域完全消失,不能实现捕获,粒子将沿 z 轴加速运动。研究还发现辐射力平衡点随着相干度 δ 的减小沿着 z 轴方向移动。本文的研究成果对于部分相干径向偏振光束在粒子的囚禁和移动等方面有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 A. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 1970, **24**(4): 156~159
- 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 Li Yinmei. *Optical Tweezers Theory and Application* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1996. 5~10
李银妹. 生命科学新技术: 光镊原理、技术和应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996. 5~10
- 4 Han Zhengpu, Guo Guangcan. The forces exerted by a single laser trapping on particles[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(7): 517~522
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, **A19**(7): 517~522
- 5 Cui Guoqiang, Li Yinmei, Weng Mingqi *et al.*. Improvement of the effective trapping force by using ring-beam laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1): 89~92
崔国强, 李银妹, 翁明琪 等. 环状光对光阱有效捕获力的提高[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1): 89~92

- 6 Lu Xuanhui, Liu Yuna, Zhao Chengliang. The investigation of radiation force of laser beams on the particles [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(6): 19~23
陆璇辉, 刘玉娜, 赵承良. 不同激光光束对微粒辐射力作用的研究与比较[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(6): 19~23
- 7 Zhu Yanying, Zhang Jingchao, Shi Shaomeng *et al.*. Calculation and numerical simulation of optical trapping force by micro-beam laser on micro-sphere particles [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 68~71
朱艳英, 张景超, 师绍猛等. 激光微束对球状介质粒子光阱力的计算与仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 68~71
- 8 Xie Jing. Feature optical tweezers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(6): 13~15
谢 婧. 光镊研究与产业现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(6): 13~15
- 9 Wang Zhong, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. Measuring the lateral force distribution of the optical trap by using the double optical trap method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 195~198
王 忠, 李银妹, 楼立人等. 双光阱法测量光阱横向力场分布[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 195~198
- 10 Yi Lianghong, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. Experimental research of doughnut, a new kind of laser trap[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 211~215
尹良红, 李银妹, 楼立人等. 空心新型光阱的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 211~215
- 11 Bao Jianhua, Gong Zan, Chen Hongtao *et al.*. Influence of the axial displacement of a trapped bead on the calibration of the force parameters of optical tweezers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1421~1424
鲍建华, 龚 鑫, 陈洪涛等. 粒子的轴向位移对光阱力学参数标定的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1421~1424
- 12 Yunli Qiu, Jinglin Liu, Zhaoxi Chen. Propagation properties of radially polarized partially coherent LG(0,1)^{*} beams[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(1): 69~73
- 13 A. T. Friberg, J. Turunen. Imaging of Gaussian Schell-model sources[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1988, **5**(5): 713~720
- 14 I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik. Table of Integrals, Series, and Products[M]. New York: Academic Press, 1980
- 15 Y. Harada, T. Asakura. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **124**(5-6): 529

栏目编辑: 宋梅梅