

利用部分相干效应获得局域空心光束

董梅梅 蒲继雄 刘晓云

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 研究一种特殊的部分相干光束经透镜聚焦后, 在几何焦点附近的三维光强分布. 结果表明, 几何焦点附近的聚焦光强分布不仅依赖于入射部分相干光的光强分布, 还依赖于入射光的空间相干度. 据此, 可以通过选择合适的空间相干度, 产生部分相干局域空心光束. 此外, 还研究入射部分相干光束的相干度和菲涅耳数对局域空心光束的影响. 结果显示, 对于相干度一定的部分相干光束, 当菲涅耳数小到一定程度时, 部分相干局域空心光束的现象将消失.

关键词 部分相干光, 空间相干, 聚焦, 菲涅耳数, 局域空心光束

中图分类号 TN 241; O 437

文献标识码 A

局域空心光束是一种在聚焦区域出现的, 中心光强较小, 四周被光强较高的区域所包围一种特殊光束, 其特殊性质使得它在原子导引、原子囚禁等方面有着广泛的应用. 另外, 还有一些研究者采用局域空心光束来构成激光导管、光学镊子^[1-4]和光学扳手, 从而实现微观粒子的精确、无接触操纵和控制. 由于部分相干光具有光强均匀、对散斑低灵敏等优点, 一些研究者对于部分相干光的聚焦进行了研究^[5,6]. 我们曾利用一种部分相干光通过透镜聚焦产生了局域空心光束, 对这种光束进行了研究^[7]. 结果发现, 在几何焦点附近的光强分布依赖于入射光束的光强分布和空间相干度. 本文通过对几何焦点附近的光强分布进行数字模拟, 进一步研究入射光的菲涅耳数对局域空心光束的影响.

1 理论分析

频率(ω)的部分相干光束被焦距为 f 的透镜聚焦, 其透镜平面部分的部分相干光束的交叉谱密度函数^[6], 可表示为

$$W^{(0)}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega) = [I^{(0)}(\mathbf{r}'_1, \omega)I^{(0)}(\mathbf{r}'_2, \omega)]^{1/2}\mu^{(0)}(\mathbf{r}'_2 - \mathbf{r}'_1, \omega), \quad (1)$$

其中, $\mu^{(0)}(\mathbf{r}'_2 - \mathbf{r}'_1, \omega)$ 为透镜平面处部分相干光束的光谱相干度. 透镜平面部分相干光束的光强分布为

$$I^{(0)}(\mathbf{r}', \omega) = W^{(0)}(\mathbf{r}', \mathbf{r}', \omega) = I_0 \exp(-\mathbf{r}'^2/2w_0^2). \quad (2)$$

上式中, \mathbf{r}'_1 和 \mathbf{r}'_2 为透镜平面的位置矢量, w_0 为光束半径. 根据交叉谱密度函数的传输定律, 光束 $W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z, \omega)$ 通过一个傍轴的光学系统可以用传输矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 表示为^[8]

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iint W^{(0)}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega) \times \exp\left[-\frac{ik}{2B}[A(\mathbf{r}'_1{}^2 - \mathbf{r}'_2{}^2) - 2(\mathbf{r}_1\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_2\mathbf{r}'_2) + D(\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2)]\right] d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2. \quad (3)$$

在式(3)中, $k = \omega/c$ 为波数, \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 是 z 平面的位置矢量. 经化简, 可得

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z, \omega) = \left[\frac{k}{2\pi(f+z)}\right]^2 \iint W^{(0)}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega) \exp\left[\frac{ikz}{2(f+z)f}(\mathbf{r}'_1{}^2 - \mathbf{r}'_2{}^2) + \right]$$

收稿日期 2006-03-11

作者简介 董梅梅(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光和光电子的研究; 通信作者: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省自然科学基金资助项目(A0510018)

$$\frac{ik}{f+z} \mathbf{r}(\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}'_2)] d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2. \tag{4}$$

令 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}$, 可得几何焦平面附近的光强分布为

$$I(r, z, \omega) = [\frac{k}{2\pi(f+z)}]^2 \iint W^{(0)}(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \omega) \exp[\frac{ikz}{2(f+z)f} (\mathbf{r}'_1^2 - \mathbf{r}'_2^2) + \frac{ik}{f+z} \mathbf{r}(\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}'_2)] d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2. \tag{5}$$

由式 (1), (2) 和式(5) 可见, 光强分布 $I(\mathbf{r}, z, \omega)$ 依赖于入射光强分布 $I^{(0)}(\mathbf{r}', \omega)$, 以及光束的光谱相干度 $\mu^{(0)}(\Delta\mathbf{r}', \omega)$ 和入射光束腰半径 w_0 . 而菲涅耳数 $N_w = w_0^2/\lambda f$ 与入射光的束腰有关. 因此, 几何焦平面附近的光强分布还依赖于入射光束的菲涅耳数. 其中, 部分相干光束在透镜平面处的 $\Delta\mathbf{r}' = \mathbf{r}'_2 - \mathbf{r}'_1$.

2 尺寸可变的局域空心光束

我们研究光束的光谱相干度, 以及菲涅耳数对几何焦平面附近光强分布的影响. 假定透镜前的部分相干光束的光谱相干度^[8] 为

$$\mu^{(0)}(\Delta\mathbf{r}', \omega) = (\frac{1}{1-\varepsilon}) \text{Besinc}(k|\Delta\mathbf{r}'|b) - (\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}) \text{B}(k|\Delta\mathbf{r}'|b). \tag{6}$$

在式(6)中, 贝森克函数 $\text{B}(u) = 2J_1(u)/u$, J_1 是一阶贝塞尔函数; $0 < \varepsilon < 1$ 和 b 是两个正的常数; 定义参数 $L = 3.832/kb$ 为表现这种特殊的空间相干度的性质^[8~10]. 研究表明, 这种光谱相干度能被光学系统合成^[11, 12], 随着 L 值或 ε 的变化, 可得到相干度可变的光束. 下面, 我们首先选取一些典型的光强分布图, 来说明入射光束的菲涅耳数和空间相干度对光强分布的影响. 设初始参数 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $L = 2 \text{ mm}$, $f = 1 \text{ m}$, $N_w = 100$, $\varepsilon = 0.2$. 通过改变入射光束的菲涅耳数 N_w 和相干度 L , 来改变几何焦平面附近处的聚焦光斑的形状. 在几何焦点附近的三维光强分布, 如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 随着菲涅耳数的减小, 这种所谓局域空心光束的暗区尺寸变大. 另外, 当菲涅耳数很小(如 $N_w = 0.5$) 时, 光束中心暗区

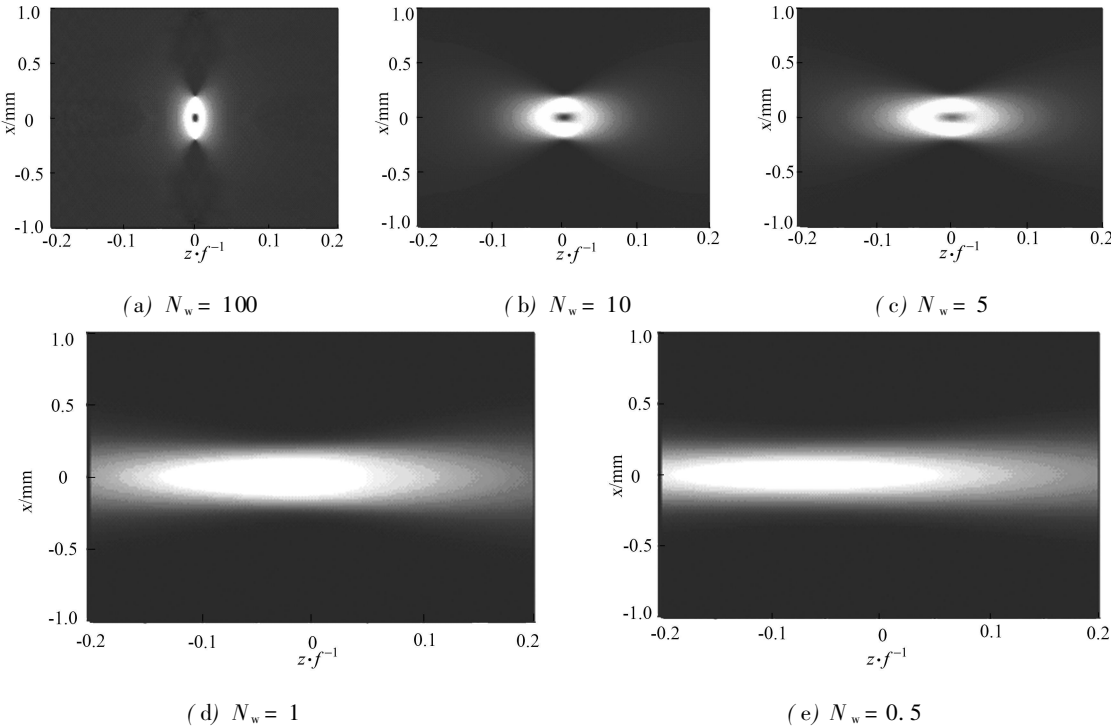
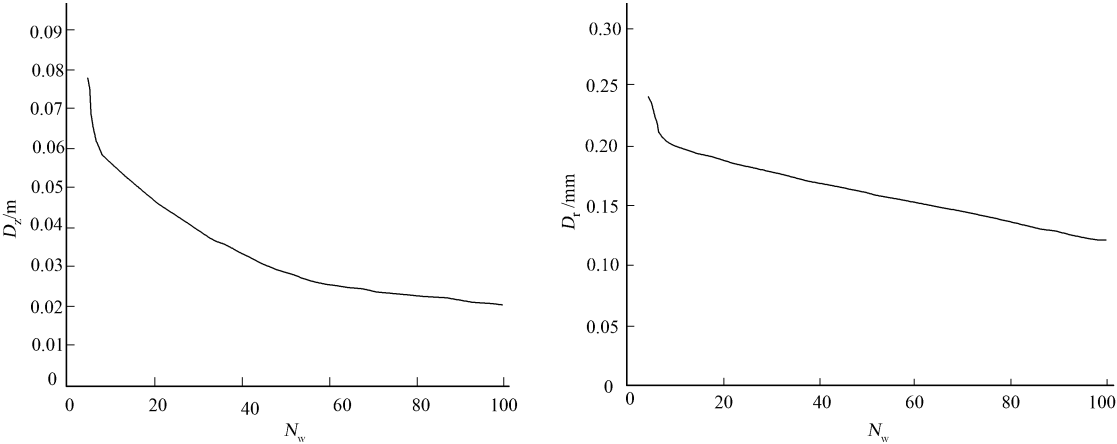


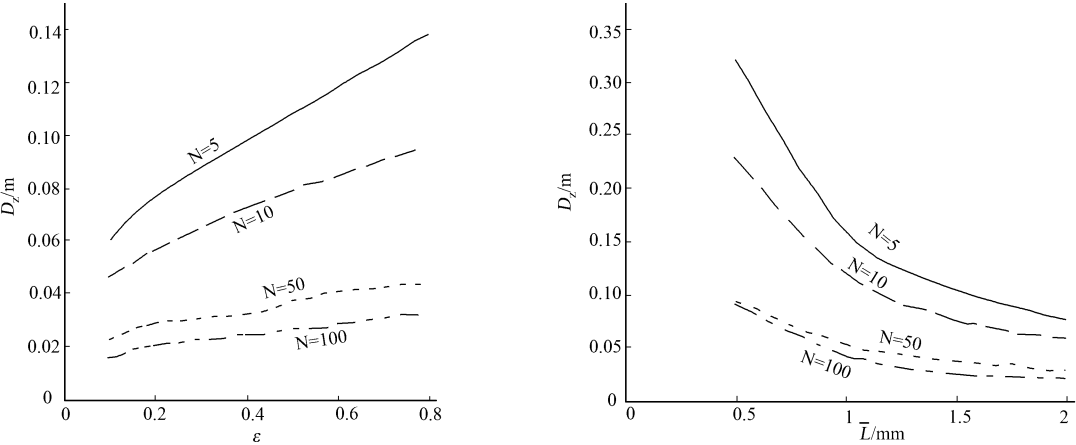
图 1 菲涅耳数对几何焦点附近光强的影响

消失, 即这种局域空心光束现象将消失, 并且出现焦移现象^[13]. 轴上的暗区尺寸 D_z 和焦平面上暗区尺寸 D_r 随菲涅耳数变化曲线, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 轴上的暗区尺寸和焦平面上暗区尺寸变化趋势一致. 对应不同的菲涅耳数时, 轴上的暗区尺寸随 ε 的变化如图 3(a) 所示. 从图中可以看出, 暗区尺寸随 ε 的增大而增大, 当 ε 不变时, 暗区尺寸随菲涅耳数的减小而增大. 当菲涅耳数不同时, 轴上暗区尺寸



(a) 轴上 (b) 焦平面

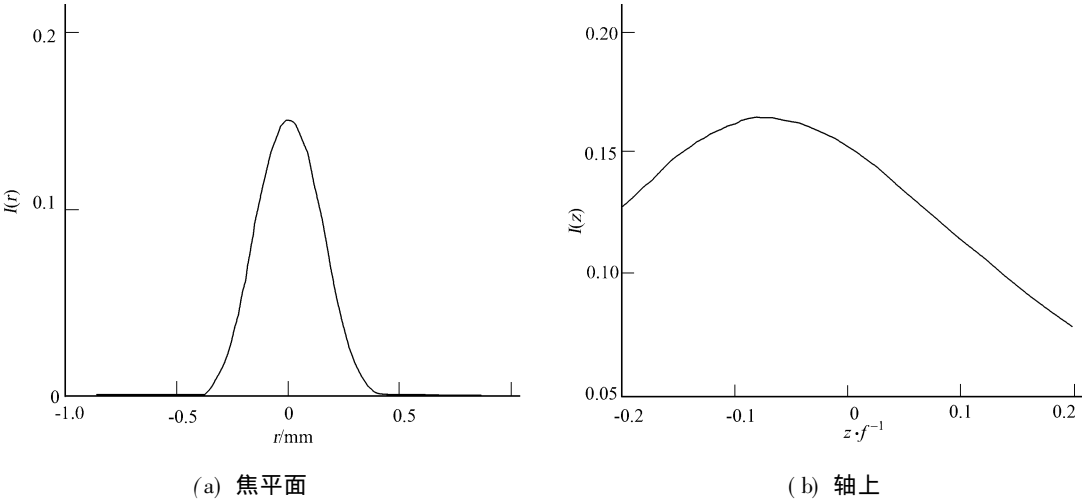
图 2 轴上和焦平面上暗区尺寸随菲涅耳数变化曲线



(a) 随拦截比的变化 (b) 随相干度的变化

图 3 对应不同的菲涅耳数的轴上暗区尺寸变化

大小随相干度 Γ 的变化曲线, 如图 3(b) 所示. 随着相干度的提高, 暗区变小. 对应着相同的相干度, 菲涅耳数越大, 暗区越小. 另外, 当菲涅耳数很小(如 $N_w = 0.5$) 时, 这种局域空心光束的现象将会消失, 如图 4 所示. 为 $N_w = 1$ 时, 焦平面处及轴上的二维光强分布, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 当 $N_w = 1$ 时, 光束中心光强与峰值光强相差很小, 几乎不能看做是局域空心光束; 而当 $N_w = 0.5$ 时, r 和 z 方向的光强



(a) 焦平面 (b) 轴上

图 4 二维光强分布

都已经变为单峰值, 这时局域空心光束现象已经消失了, 并且 z 方向出现焦移现象.

3 结 论

本文研究了部分相干光聚焦在几何焦点附近的三维光强分布, 以及其形成的局域空心光束暗区大小随相干度及菲涅耳数的变化情况. 研究结果表明, 在几何焦点附近的光强分布不仅依赖于入射光束的光强分布、空间相干度, 还依赖于入射光束的菲涅耳数. 而且, 当菲涅耳数很小(如 $N_w = 0.5$)时, 局域空心光束的现象将消失. 基于以上几点, 我们可以改变入射光束的菲涅耳数和相干度, 以此来获得所希望的光强分布.

参 考 文 献

1 Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure[J]. Appl Phys Lett, 1971, 19(65): 283~ 285
2 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
3 Barrett M D, Sauer J A, Chapman M S. All optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate[J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(1): 0104041~ 0104044
4 印建平, 高伟建, 夏 勇. 中性原子在单束局域空心光束中的 Sisyphus 冷却[J]. 量子光学学报, 2002, 8(9): 26
5 蔡阳健, 林 强. 部分相干平顶高斯光束的传输特性[J]. 光电子激光, 2001, 12(12): 1301~ 1304
6 彭愿杰, 吕百达. AGSM 光束在自由空间中的传输[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 417~ 420
7 刘晓云, 蒲继雄. 部分相干椭圆光斑[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(6): 821~ 824
8 Tervonen E, Friberg A T, Turunen J. Gaussian Schell mode beams generated with synthetic acousto-optic hologram [J]. Opt Soc Am A, 1992, 9(5): 796~ 803
9 Pu Jixiong, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture[J]. IEEE J Quant Electron, 2000, 36(12): 1407~ 1411
10 Anand S, Yadav B K, Kandpal H C. Experimental study of the phenomenon of $1 \times N$ spectral switch due to diffraction of partially coherent light[J]. Opt Soc Am (A), 2002, 19(11): 2223~ 2287
11 Pan Liuzan, Li Baida. Spectral changes of diffracted polychromatic gaussian beams in the far field[J]. Opt & Laser Technol, 2004, 36: 501~ 506
12 Pu Jixiong, Nemoto S. Anomalous behaviors of the Fraunhofer diffraction patterns for a class of partially coherent light[J]. Opt Express, 2003, 11(4): 339~ 346
13 Li Yajun, Wolf E. Focal shifts in diffracted converging spherical waves[J]. Opt Commun, 1981, 39(4): 211~ 215

Generation of Partially Coherent Bottle Beam with
Variable Size by Partially Coherent Effect

Dong Meimei Pu Jixiong Liu Xiaoyun

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract In this paper, we have investigated a particular class of partially coherent beam focused by a lens. The three dimensional intensity distribution near geometrical focus is investigated. It is shown that the focused intensity distribution near the geometrical focus is dependent not only on the intensity distribution of the incident partially coherent beam, but also on the degree of coherence. A partially coherent bottle beam can be generated by choosing appropriate degree of spatial coherence. The influence of the Fresnel number and the degree of coherence of the incident partially coherent beam on the partially coherent beam is studied. We find that, for a certain degree of spatial coherence, the partially coherent bottle beam disappears if the Fresnel number is too small.

Keywords partially coherent light, spatial coherence, focus, Fresnel number, bottle beam