

聚焦高阶 Bessel-Gauss 光束重建的理论和实验研究*

吴逢铁[†] 马亮 张前安 郑维涛 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2010年12月9日收到; 2011年3月24日收到修改稿)

提出利用薄透镜元件对聚焦后的高阶 Bessel-Gauss 光束进行重建. 基于衍射理论, 分析了高阶 Bessel-Gauss 光束聚焦后的重建行为, 数值模拟高阶 Bessel-Gauss 光束经薄透镜聚焦再通过另一薄透镜重建的三维光场分布和截面光强分布图. 结果表明, 高阶 Bessel-Gauss 光束经单个薄透镜后产生中空局域空心光束, 在焦点位置处为圆环, 尔后迅速发散; 在焦点后合适位置处放入另一薄透镜可矫正焦点后发散的光束, 使得其后光场不变, 仍满足 Bessel 分布; 实验结果与理论分析相符合. 研究结果对光镊、粒子捕获与操控具有一定的指导意义.

关键词: 衍射理论, 传输矩阵, 高阶 Bessel-Gauss 光束, 重建

PACS: 42.25.-p, 42.25.Fx, 41.85.Ja

1 引言

高阶 Bessel-Gauss 光束 (HBGBs) 因具有中心光强为零、自由空间中光场不变、并带有螺旋相位因子等性质而引起人们的广泛关注^[1-3], 这些独特的性质使其在激光准直、光镊、信息编码、光学微粒操控等领域具有潜在的应用前景^[4-7].

HBGBs 可通过高阶 Laguerre-Gauss 光束入射轴棱锥产生^[8], 也可以通过全息光学元件方法产生^[9]. 关于 HBGBs 的传输与变换一直是人们研究的热点. 赵道木等^[10]比较了线偏振和方位角偏振的零阶和一阶 Bessel-Gauss 光束经 ABCD 系统传输的特性, Eyyuboglu^[11]研究了其在湍流介质中的传输过程, 赵承良等^[12]分析了其通过一阶失调光学系统时的传输过程, 陆璇辉等^[13]研究了 HBGBs 经单个薄透镜后的光束聚焦过程, 但文献^[13]仅限于理论分析, 并未实验验证, 且如何重建经透镜聚焦后的 HBGBs 尚未进行过探讨. 本文提出利用薄透镜对聚焦后的 HBGBs 进行重建, 基于衍射理论分析了重建过程, 数值模拟聚焦后又实现重建的三维纵向光强分布. 研究结果表明 HBGBs 经薄透镜聚焦特性与零阶 Bessel 光束聚焦过程相似^[14], 都会产生局域空心光束, 且焦平面处为一亮环; 在薄透镜后适当位置处插入另一薄透镜可保持其后光

场不变, 仍满足 Bessel 分布, 实现 HBGBs 的重建; 最后利用螺旋相位板和轴棱锥等元件设计实验, 实验结果很好地验证了理论分析.

2 高阶 Bessel-Gauss 光束

高阶贝塞尔光束同零阶 Bessel 光束一样, 也是非平方可积的, 理想的高阶 Bessel 光束具有无限大的能量, 实际上是不可能实现的. 而 HBGBs 的径向分布受 Gauss 函数调制, 是可以实现的, 因此研究 HBGBs 的传输就更有现实意义.

HBGBs 的光场表达式为

$$E(r, \theta) = E_0 J_n(\alpha r) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp(-in\theta), \quad (1)$$

其中 E_0 为常数, ω 是 Gauss 光束的光腰大小, n 是 Bessel 函数的阶数.

由 (1) 式可以看出, 光场振幅受 Gauss 函数的调制, 且光腰 ω 越小, 振幅受调制越明显. 图 1 为不同光腰时一阶 Bessel-Gauss 光的截面光强图.

3 HBGBs 的聚焦和重建

近轴近似下, 设 HBGBs 通过传输矩阵

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068, 6117805)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金 (批准号: SG-001102)、华侨大学学科重点建设项目和泉州市科技重点项目 (批准号: 2011G9) 资助的课题.

[†] E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统, 由柱坐标下的 Collins 公式可知传输后的光场

$$E_2(\rho, \varphi, z) = -\frac{i}{\lambda B} \exp(ikz) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E_0 J_n(\alpha r) \times \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp(-in\theta) \times \exp\left\{\frac{ik}{2B} [Ar^2 - 2r\rho \cos(\varphi - \theta) + D\rho^2]\right\} r dr d\theta, \quad (2)$$

则光强分布为

$$I(\rho, z) = (|E_2(\rho, \varphi, z)|)^2 = \left(\frac{E_0}{\lambda B}\right)^2 \left| \int_0^{+\infty} J_n(\alpha r) J_n\left(\frac{kr\rho}{B}\right) \times \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2}\right] \exp\left\{\frac{ik}{2B} [Ar^2 + D\rho^2]\right\} \times dr \right|^2. \quad (3)$$

我们知道零阶 Bessel 光经薄透镜聚焦后可产生中空的局域空心光束 (bottle beam)^[14], 再经过另一薄透镜可实现零阶 Bessel 光的重建^[15]. 下面先分析 HBGBs 经单个薄透镜后的聚焦过程, 再重点分析经过另一薄透镜后的重建过程.

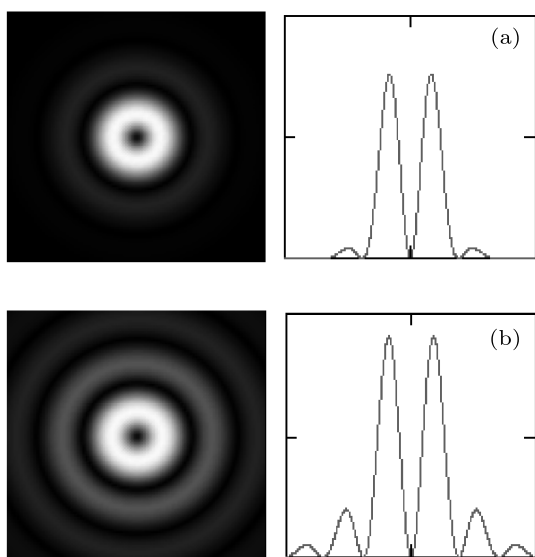


图 1 不同光腰尺寸的一阶 Bessel-Gauss 光束截面光强
图 (a) $\omega = 0.25$ cm; (b) $\omega = 0.5$ cm

图 2 为 HBGBs 经薄透镜系统聚焦后再重建示意图, 两个透镜的焦距分别为 f_1, f_2 , 它们之间的距离是 $f_1 + f_2$.

利用 (3) 式可求经单个薄透镜 f_1 聚焦后 z_1 处

的光场分布, 此时的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z_1}{f} & z_1 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

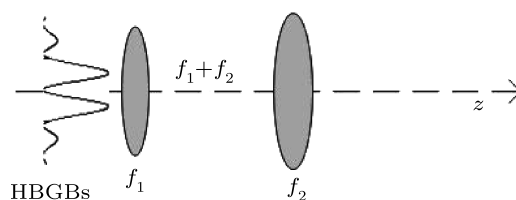


图 2 HBGBs 入射薄透镜系统示意图

将 (4) 式中的 $ABCD$ 代入 (3) 式可得 z_1 处的光场分布

$$I(\rho, z_1) = \left(\frac{E_0}{\lambda z_1}\right)^2 \left| \int_0^{+\infty} J_n(\alpha r) \times J_n\left(\frac{kr\rho}{z_1}\right) \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2}\right] \exp\left\{\frac{ik}{2z_1} \times \left[\left(1 - \frac{z_1}{f}\right)r^2 + \rho^2\right]\right\} r dr \right|^2. \quad (5)$$

如果要获得薄透镜 f_2 后 z_2 处的光场分布, 则此时的传输矩阵变为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & f_1 + f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f_2}{f_1} & \frac{f_1 f_2 + f_1^2 - f_1 z_2}{f_1} \\ \frac{f_2}{f_1^2} - \frac{1}{f_2} & \frac{f_2}{f_1} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将 (6) 式中的 $ABCD$ 代入 (3) 式可得透镜 f_2 后 z_2 处的光场分布

$$I(\rho, z_2) = \left(\frac{E_0 f_2}{\lambda(f_1 f_2 + f_1^2 - f_1 z_2)}\right)^2 \left| \int_0^{+\infty} J_n(\alpha r) \times J_n\left(\frac{kr\rho f_2}{f_1 f_2 + f_1^2 - f_1 z_2}\right) \times \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2}\right] \exp\left\{\frac{ik f_2}{2(f_1 f_2 + f_1^2 - f_1 z_2)} \times \left[\left(-\frac{f_2}{f_1}\right)r^2 + \left(-\frac{f_1}{f_2}\right)\rho^2\right]\right\} r dr \right|^2. \quad (7)$$

根据 (5) 和 (7) 式模拟 z 传播轴上的光场分布, 选择

薄透镜 f_1 为 z 轴起点位置, 模拟参数选择 $E_0 = 1$, $n = 1$, $\alpha = 1$, $\omega = 0.5$ cm, $f_1 = 10$ cm, $f_2 = 10$ cm.

图 3 为一阶 Bessel-Gauss 光束经薄透镜 f_1, f_2 后的三维光场分布图, 薄透镜 f_1, f_2 分别在 $z = 0, 20$ cm 位置处, 图 4 为 z 轴不同位置处的截面光强图, 由图 3 和图 4 可以看出, 一阶 Bessel-Gauss 光束经过薄透镜 f_1 聚焦后会产生局域空心光束, 在焦点 $z = 10$ cm 处截面光强分布为一亮环, 而在焦点后暗域尺寸变小, 光束继续发散, 且中心光强始终为零. 当聚焦后的光束经薄透镜 f_2 后光斑保持不变, 光强分布仍满足高阶 Bessel 分布, 实现一阶 Bessel-Gauss 光束的重建.

由图 (3) 和 (4) 可直观地看出, HBGBs 经薄透镜聚焦, 在焦点附近产生中空局域空心光束, 但在合适位置处插入另一薄透镜, 可矫正聚焦后发散

的高 HBGBs, 使后面的光强分布仍然满足 Bessel 分布, 即实现 HBGBs 的重建, 对光引导、光导管、粒子捕获具有指导意义.

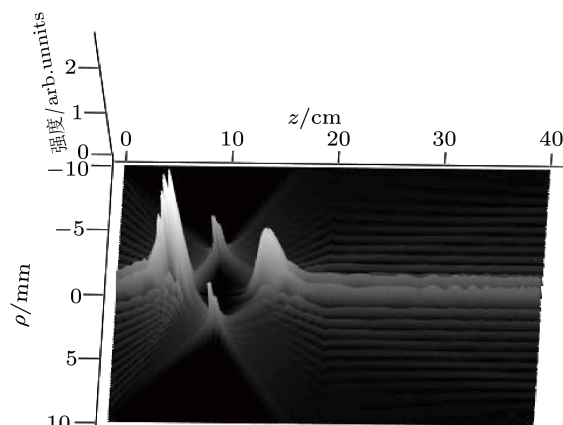


图 3 z 轴上的三维光场分布

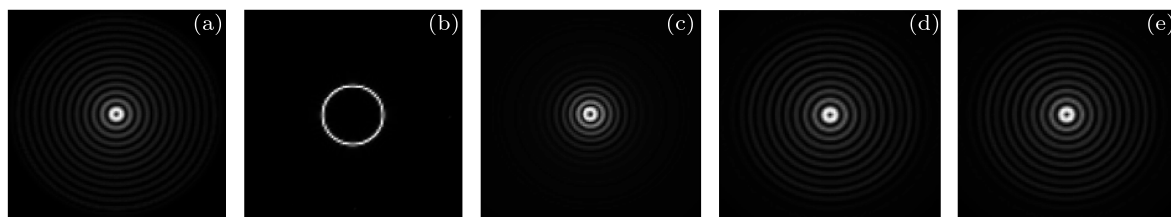


图 4 z 轴不同位置处的截面光强分布 (a) $z = 14$ cm; (b) $z = 10$ cm; (c) $z = 18$ cm; (d) $z = 25$ cm; (e) $z = 30$ cm

4 实验分析

实验中选择光源为 $\lambda = 632.8$ nm 的氦氖激光, 经准直扩束以后入射螺旋相位板和轴棱锥元件产生 HBGBs, 再经过透镜聚焦, 然后经过另一透镜重建. 实验装置图见图 5.

螺旋相位板的拓扑电荷数为 1, 轴棱锥底角 $\gamma = 0.5^\circ$, 当氦氖激光通过螺旋相位板和轴棱锥元件后可产生一阶 Bessel-Gauss 光束; 薄透镜 f_1, f_2 焦距均为 10 cm, 且 f_1 和 f_2 相距 20 cm; 利用 OPHIR 公司 SP620U 型电荷耦合器件 (CCD)

成像系统拍摄截面光强图, 选择透镜 f_1 为 z 轴起点位置. 图 6 为实验拍摄 z 轴不同位置处的截面光强图, 和理论模拟图 4 相符合.

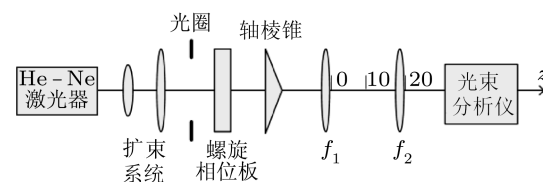


图 5 实验装置图

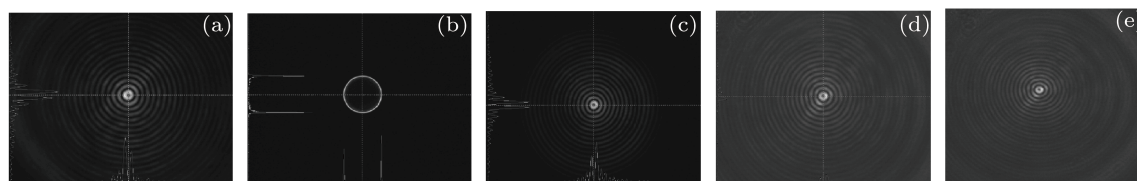


图 6 实验拍摄 z 轴不同位置处的截面光强图 (a) $z = 1$ cm; (b) $z = 10$ cm; (c) $z = 18$ cm; (d) $z = 25$ cm; (e) $z = 30$ cm

5 结论

基于柱坐标下的 Collins 公式, 分析了 HBGBs 经薄透镜聚焦; 再经过另一薄透镜重建的过程, 数值模拟了沿传播轴上的三维光场分布和轴上不同位置处的截面光强图, 从模拟图可以很直观地看出 HBGBs 经单个薄透镜后会产生局域空心光束, 在焦点位置处截面光强为一亮环; 在焦点后合适位

置处放入另一薄透镜可矫正焦点后发散的光束, 使得其后光场不变, 仍满足 Bessel 分布, 实现 HBGBs 的重建, 且中心光强始终保持为零; 实验结果与模拟分析结果基本符合. 研究结果对 HBGBs 在原子引导、囚禁和光学俘获等方面的应用具有指导意义.

感谢李成良在实验中给予的支持和帮助.

-
- [1] Vasilyeu R, Dudley A, Khilo N, Forbes A 2009 *Opt. Express.* **26** 23389
 - [2] Chen J N, Yu Y J 2010 *Opt. Comm.* **283** 1655
 - [3] Mei Z R, Zhao D M, Wei X F, Jing F, Zhu Q H 2005 *Optik* **116** 521
 - [4] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke A S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
 - [5] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Pasko V, Barnett S M, Franke A S 2004 *Opt. Express.* **12** 5448
 - [6] Wang Z L, Yin J P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2466
 - [7] Ma L, Wu F T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6096 (in Chinese) [马亮, 吴逢铁 2010 物理学报 **59** 6096]
 - [8] Arlt J, Dholakia K 2000 *Opt. Comm.* **177** 297
 - [9] Vasara A, Turunen J, Friberg T 1989 *J. Opt. Soc. Am. A* **6** 1748
 - [10] Zhao D M, Wang S M 1996 *Opt. Comm.* **131** 8
 - [11] Eyyuboglu H T 2007 *Appl. Phys. B* **88** 259
 - [12] Zhao C L, Wang L G, Lu X H, Chen H 2007 *Opt. Laser Technol.* **39** 1199
 - [13] Lu X H, Chen X M, Zhang L, Xue D J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 2155
 - [14] Wu F T, Lu W H, Ma B T 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2557 (in Chinese) [吴逢铁, 卢文和, 马宝田 2009 光学学报 **29** 2557]
 - [15] Chavez-Cerda S, New G H C 2000 *Opt. Commun.* **181** 369

Experimental and theoretical study on the reconstruction of focused high order Bessel-Gauss beam*

Wu Feng-Tie[†] Ma Liang Zhang Qian-An Zheng Wei-Tao Pu Ji-Xiong

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

(Received 9 December 2010; revised manuscript received 24 March 2011)

Abstract

Reconstruction of focused high order Bessel-Gauss beam by using thin lens is proposed. Based on the diffraction theory, reconstruction behavior of focused high order Bessel-Gauss beam is analyzed. The three-dimensional optical intensity distribution and the cross-section optical intensity distribution of the high order Bessel-Gauss beam focused by first thin lens, and then reconstructed by the second thin lens are numerical simulated. Result shows that the high order Bessel-Gauss beam passing through the single thin lens can generate Bottle beam, and the bright ring is obtained at focus. To rectify the beam divergence after focus, another thin lens is introduced at suitable position. After that, the beam keeps the Bessel distribution. Experiment is conducted, and experimental results are in agreement with the theoretical analyses. Research result shows its significance in providing a guidance for optical tweezers, particle trapping and controlling.

Keywords: diffraction theory, propagation matrix, high order Bessel-Gauss beam, reconstruction

PACS: 42.25.-p, 42.25.Fx, 41.85.Ja

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977068, 61178015), the Open Foundation of the High Power Laser Physics Key Laboratory, China (Grant No. SG-001102), the Key Project of Huaqiao University, China, and the Science and Technology Key Project of Quanzhou City, China (Grant No. 2011G9).

[†] E-mail: fengtie@hqu.edu.cn