

文章编号: 0258-7025(2009)11-2899-03

贝塞耳光束相干产生局域空心光束的实验研究

吴逢铁 刘 彬 卢文和 马宝田

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 利用轴棱锥产生的两束贝塞耳光相干实现局域空心光束。基于“相干贝塞耳光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束”的理论,数值模拟了两束贝塞耳光干涉后光场沿传输距离变化的光强分布及一个周期内光强的演变和局域空心光束的形成过程。实验中通过两个不同底角的轴棱锥产生两束具有不同径向波矢的贝塞耳光进行相干形成局域空心光束,实验结果与理论分析及数值模拟相吻合。

关键词 物理光学; 轴棱锥; 相干贝塞耳光; 局域空心光束

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2899

Experiment Study on Bottle Beam Generated by Interfering Bessel Beams

Wu Fengtie Liu Bin Lu Wenhe Ma Baotian

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

Abstract An experiment study on the bottle beam which are produced by the interfering of the two Bessel beams generated from the axicons is proposed. Based on the “bottle beam with Talbot effect generated by interfering Bessel beam”, the three-dimensional optical intensity distribution of the superimposed optical field along the propagation distance and the intensity evolution of the bottle beams in a complete period are simulated numerically. In the experiment, the bottle beam is generated by two interfering Bessel beams with different radial wave vector. Our result fits well with theoretical calculation and numerical simulation.

Key words physical optics; axicon; interfering Bessel beams; bottle beam

1 引 言

局域空心光束是一道沿光束传播方向上有着强度为零的区域,并在此区域外三维空间围绕着高强度的光的光束^[1]。正因为其特殊的光场分布以及在光镊、光学微操作等方面的重要作用引起了人们极大的兴趣^[2]。

目前,产生局域空心光束的方法有多种。例如, Po-Tse Tai 等^[3]通过抽运光束和限制孔径的端面抽运固体激光器来产生空心光,Zhao Yiqiong 等^[4]提出了一种利用衍射光学元件来产生光链的方法。随着光束整形技术的发展,J. Arlt 等^[1]利用高斯光束和拉盖尔-高斯光束干涉产生空心光,S. Monk

等^[5,6]发现 Bessel 光聚焦后也可形成局域空心光。对此,我们实验小组进行了深入的研究并用实验验证^[7,8]。Z. Jaroszewicz 等^[9]曾研究了理想 Bessel 光的干涉问题,但在解释两束 Bessel 光的干涉叠加时做了很大的简化,得到的结果为近似结果。S. Chavez-Cerda 等^[10]具体分析了环缝-透镜法产生的两束 Bessel 光的干涉叠加情况,然而由环缝-透镜法产生的 Bessel 光转换效率很低(约 15%),且他们对 Bessel 光的干涉问题没有涉及局域空心光的研究。2004 年 B. P. S. Ahluwalia 等^[11]利用空间光调制器进行实验,但实验结果也不甚理想,且能量转换效率小于 50%。

收稿日期: 2009-01-13; 收到修改稿日期: 2009-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(60477041)和福建省自然科学基金(A0710011)资助课题。

作者简介: 吴逢铁(1958-),男,教授,博士,主要从事光束传输与控制、超短光脉冲及其非线性效应等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(中国光学学会会员号:3629212)

由于轴棱锥产生的 Bessel 光束具有结构简单, 光转换效率高(接近 100%)及光损伤阈值高等优点^[12], 我们实验了利用轴棱锥产生的 Bessel 光干涉形成具有自成像塔尔博特效应的空心光束。其中理论分析在参考文献[13]中已有较详细的报道。本文理论上模拟了干涉叠加后的光场沿传输距离变化的三维光强及一个完整周期内局域空心光的形成过程, 实验中利用两个不同底角的轴棱锥产生两束具有不同径向波矢的 Bessel 光进行相干, 实验结果和理论分析及数值模拟相吻合。

2 理论分析及数值模拟

两束同频率、不同径向波矢的 Bessel 光干涉叠加光强为^[13]

$$I = J_0^2(k_{r1}\rho) + J_0^2(k_{r2}\rho) + 2J_0(k_{r1}\rho)J_0(k_{r2}\rho) \times \cos[(k_{z1} - k_{z2})z + \theta], \quad (1)$$

其中 k_r, k_z 分别表示径向和轴向波矢分量, $k = \sqrt{k_r^2 + k_z^2} = \frac{c}{\omega}$ 为波数, ρ, z 分别表示径向距离和轴向距离。根据(1)式模拟了由两个不同底角的轴棱锥产生的两束同频率 Bessel 光相干叠加后沿传输方向上的光强变化。模拟中所选用的参数为: $\theta = 0$, 波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 轴棱锥底角 $\gamma_1 = 0.5^\circ, \gamma_2 = 1^\circ$, 轴棱锥折射率 $n = 1.458$, 波数 $k_1 = k_2 = \frac{2\pi}{\lambda}, k_{r1} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_1, k_{r2} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_2, k_{z1} = \sqrt{k_1^2 - k_{r1}^2}, k_{z2} = \sqrt{k_2^2 - k_{r2}^2}$ 。模拟结果如图 1 所示。

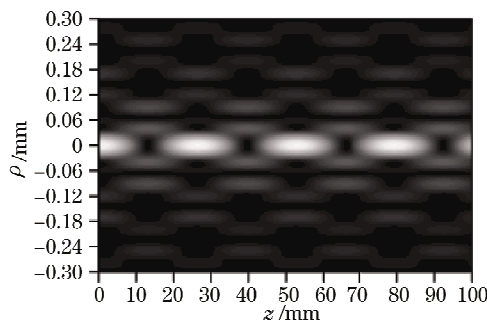


图 1 两束同频率 Bessel 光相干产生局域空心光束的光强分布

Fig. 1 Optical intensity distribution of the bottle beam generated by interfering Bessel beams with the same frequency

图 1 描述了沿光的传输方向上的光强分布图, 从图中可以看出, 叠加后的 Bessel 光场具有周期性的自成像, 该周期可表示为

$$z_T = \left| \frac{2\pi}{k_{z1} - k_{z2}} \right|, \quad (2)$$

它取决于两束 Bessel 光的径向波矢分量的差值。通过计算, 理论上得到像重建的空间周期为 $z_T = 26 \text{ mm}$ 。为了更清楚地呈现局域空心光束的周期性, 模拟了一个完整周期内不同 z 平面处的二维光强分布图, 如图 2 所示。

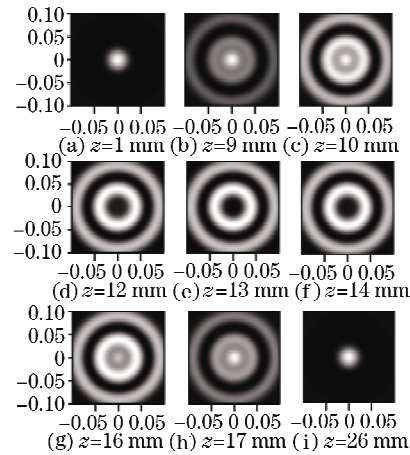


图 2 一个完整周期内不同 z 平面的二维光斑图

Fig. 2 2D beam patterns on different transverse planes in one complete cycle

图 2 给出了单个局域空心光束的演变过程。从图中可以看出, 光斑的中心光强经历了由亮变暗, 再变亮的过程。在 13 mm 处, 两束 Bessel 光的相干相消, 此时中心光斑的亮度最低, 光强最小。在 26 mm 处, 两 Bessel 光的振幅相干增强, 中心光斑的亮度最高, 光强最大, 且光斑又重新恢复到初始状态, 完成了一个周期的演变。

3 实验结果

根据理论分析, 设计了相应的实验, 实验装置如图 3 所示。

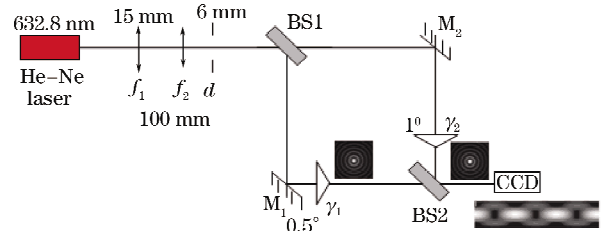


图 3 两束 Bessel 光相干产生局域空心光束的实验示意图

Fig. 3 Experimental schematic diagram of the optical bottle beam generated by interfering Bessel beams

实验中, 从 He-Ne 激光器发射的波长为

632.8 nm 的高斯光束经过焦距分别为 $f_1 = 15$ mm, $f_2 = 100$ mm 的透镜准直扩束并由光阑 $d = 6$ mm 限孔, 利用 50%:50% 分束镜 BS1 分束, 分束光通过全反镜 M_1, M_2 反射后分别投射到轴棱锥 γ_1, γ_2 上, 再利用一个 50%:50% 的分束镜 BS2 把两轴棱锥产生的 Bessel 光束叠加相干, 最后通过显微镜及 CCD 照相系统即可观察到局域空心光束。

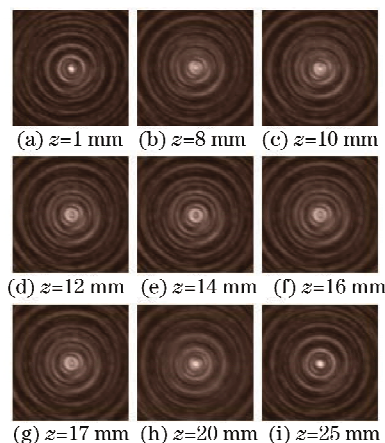


图 4 一个周期内不同 z 平面的二维光斑实验图

Fig. 4 2D experimental beam patterns on different transverse planes in one complete cycle

通过图 3 实验装置, 得到的激光光束的转换效率大于 90%, 比环缝-透镜系统以及全息技术实验的转换效率要高出很多。相对于理论分析, 同样拍摄了由两束 Bessel 光相干叠加产生的一个周期内不同 z 平面的干涉实验光斑图, 测量的距离分别为 1 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 17 mm, 20 mm, 25 mm。实验结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 这一组光斑同样经历了轴上中心光强为零到轴上中心光强不为零的变化过程, 光斑中心光强最小的位置出现在距离为 14 mm 的地方, 图 4(i) 又恢复到与图 4(a) 相同的初始光斑。25 mm 内的距离覆盖了一个空心光束完整的振动周期, 完成了一个周期的演变过程。综合图 2 与图 4 可以看出, 实验结果与理论模拟吻合良好。

4 结 论

基于“相干贝塞耳光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束”的理论进行由轴棱锥产生的两束 Bessel 光相干实现局域空心光束的实验研究, 讨论了不同参数情况下两束相干 Bessel 光叠加产生局域空心光束的演变过程。理论上, 完成一个周期的演变需 26 mm, 光强最低点出现的位置为 13 mm

处, 而实验完成一个周期演变的过程为 25 mm, 光强最低点出现在 14 mm 处, 理论与实验结果基本吻合。最近人们对 Bessel 光干涉应用研究指出, 利用 Bessel 光相干原理制成的干涉仪可以对物质表面进行光学探测^[14], 通过 Bessel 光束干涉测量法可进行光学测试, 同时相干 Bessel 光还可对粒子进行光学微操作^[2]。

参 考 文 献

- 1 J. Arlt, M. J. Padgett. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 191~193
- 2 D. McGloin, V. Garcés-Chávez, K. Dholakia. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8): 657~659
- 3 Po-Tse Tai, Wen-Feng Hsieh, Ching-Iisu Chen. Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 5827~5833
- 4 Zhao Yiqiong, Zhan Qiwen, Li Yongping. Design of DOE for the control of optical “bubble” generated by highly focused radially polarized beam[C]. *SPIE*, 2004, **5514**: 616~625
- 5 S. Monk, J. Arlt, D. A. Robertson *et al.*. The generation of Bessel beams at millimetre-wave frequencies by use of an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**: 213~215
- 6 J. Arlt, K. Dholakia. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**: 297~301
- 7 Zeng Xiahui, Wu Fengtie, Liu Lan. The description of bottle beam based on the interferential theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 195~201
- 8 曾夏辉, 吴逢铁, 刘 岚. 干涉理论对 bottle beam 的描述[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 195~201
- 9 Liu Lan, Wu Fengtie. Description of bottle beam and reconstruction of Bessel beam based on diffraction integral theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 370~374
- 10 刘 岚, 吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 370~374
- 11 Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk. Diffractive patterns of small cores generated by interference of Bessel beams [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 839~841
- 12 S. Chavez-Cerda, E. Tepichin, M. A. Meneses-Nava *et al.*. Experimental observation of interfering Bessel beams [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(13): 524~529
- 13 B. P. S. Ahluwalia, X-C. Yuan, S. H. Tao. Generation of self-imaged optical bottle beams [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**: 177~184
- 14 Wu Fengtie, Chen Yunbin, Guo Dongdong *et al.*. Parameters analysis and measurement of nanosecond diffraction-free Bessel laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1073~1076
- 15 吴逢铁, 陈云彬, 郭东栋等. 纳秒无衍射贝塞耳光脉冲冲量的分析与测定[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1073~1076
- 16 Wu Fengtie, Zeng Xiahui. Bottle beam with Talbot effect generated by interfering Bessel beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 174~178
- 17 吴逢铁, 曾夏辉. 相干贝塞耳光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 174~178
- 18 M. Fortin, M. Piche, E. F. Borra. Optical tests with Bessel beam interferometry [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 5887~5895