

双轴棱锥产生长距离近似无衍射光的新技术*

郑维涛 吴逢铁[†] 张前安 程治明

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021)

(2011年10月16日收到; 2011年11月16日收到修改稿)

提出了一种利用会聚透镜、轴棱锥等简单光学元件产生长距离近似无衍射光的新技术. 分别利用几何光学和衍射理论分析了该方法产生长距离近似无衍射光束的原理, 通过软件模拟了长距离近似无衍射光束的形成过程, 得出了该光束在不同距离处的横向光强分布. 模拟结果显示该光束在较长距离处的横向光强分布满足 Bessel 分布. 从实验上获得了传播距离长达 80 m、中心光斑发散角约为 0.12 mrad 的近似无衍射光束, 相比于国外学者最近的研究成果 (Belyi et al. 2010 Opt. Exp. **18** 1966) 将传播距离延长了 50 多米, 而光束发散角压缩了 22 倍. 实验中, 对光束沿光轴传播时在不同距离处的光斑进行了拍摄, 所得实验结果与理论分析基本符合.

关键词: 长距离近似无衍射光, 聚焦透镜, 轴棱锥

PACS: 42.15.Eq, 42.25.-P, 42.25.Bs, 42.25.Fx

1 引言

无衍射光束具有在自由空间传播时保持光强分布不变、中心光斑小、光强高度集中以及自重建等一系列独特的性质. 因此, 自从它被提出以来得到了广泛的研究^[1-9]. 虽然受到不存在无限大能量的限制而得不到严格意义上的无衍射光束, 但是, 在实验室得到的近似无衍射光束几乎具备了无衍射光束应有的特性. 早期的研究者指出无衍射光束可以应用于高精度定向、测距、准直、激光加工以及生物工程等多种领域. 到目前, 已经有多种方法可以产生近似无衍射光束, 如轴棱锥法^[10,11]、计算机全息法^[12,13]、环逢-透镜法^[1,2]、透镜轴棱锥法^[14-16]、谐振腔法^[17,18]等. 但是以上各种方法均因受到有限孔径等诸多因素的限制而不能得到传输距离很长的近似无衍射光束. 如实验室最常用的轴棱锥法, 其产生的近似无衍射光的最大传输距离^[19]为 $Z_{\max} = R/(n-1)\gamma$ (其中 R 是入射光束半径, n 为轴棱锥材料折射率, γ 是轴棱锥

底角). 从上述表达式中可以看出, 近似无衍射光的最大传输距离正比于入射光束半径, 反比于轴棱锥底角. 这就意味着用半径为 5 mm 的光束照射一个底角为 0.5°、折射率为 1.516 的轴棱锥, 得到的近似无衍射光束的最大无衍射距离仅仅为 1.11 m 左右. 这使得近似无衍射光束在定向、测距、准直等方面的应用受到了很大的限制. 因此, 如何能获得传播距离长且光束质量好的近似无衍射光束就显得尤为重要. 国内外也有学者进行了一些相关研究, 例如, 赵斌等^[20]利用望远镜系统对轴棱锥产生的无衍射光进行扩束, 从而得到长距离的近似无衍射光, 但是这种方法在扩大无衍射距离的同时也将近似无衍射光中心光斑放大了. Belyi 等^[21]用经过会聚透镜聚焦后的球面波连续通过两个轴棱锥的方法将近似无衍射光的无衍射距离扩大到了 25 m 左右, 然而这种方法产生的近似无衍射光束的中心光斑发散同样相当厉害 (发散角约为 2.73 mrad). 本文利用透镜对轴棱锥产生的近似无衍射光进行聚焦, 得到具有一定发散角的环状光束, 以此光束入射到另一个底角稍大的轴棱锥, 从而得到了无衍射距离

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068, 61178015)、福建省自然科学基金 (批准号: 2012J01278) 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

可达 80 m 甚至更远的近似无衍射光束, 该光束的发散角相对较小.

2 理论分析

平行光经过轴棱锥后会产生比较理想的近似无衍射光束, 在无衍射距离内插入一个会聚透镜, 将会在透镜焦距处得到一个聚焦亮环, 其后将形成具有一定发散角的环状光束 [22]. 这种具有一定发散角的环状光束再经过轴棱锥就会形成新的近似无衍射光束. 由几何光学模拟可知, 环状光束产生

的近似无衍射光的最大无衍射距离比较短, 如图 1 叠加阴影所示. 而当入射的环状光束具有一定发散角时, 近似无衍射距离将会变得更长, 如图 2 和图 3 所示.

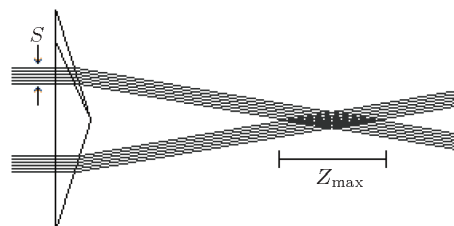


图 1 环状光束产生近似无衍射光

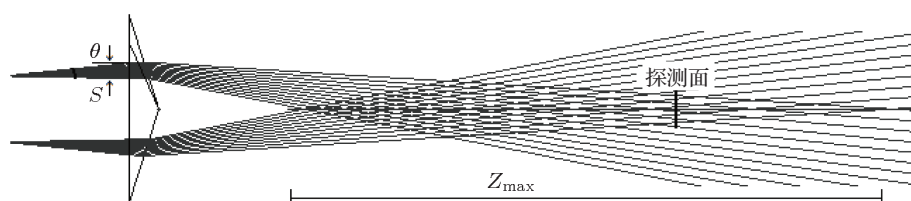


图 2 具有发散角的环状光束产生近似无衍射光示意图

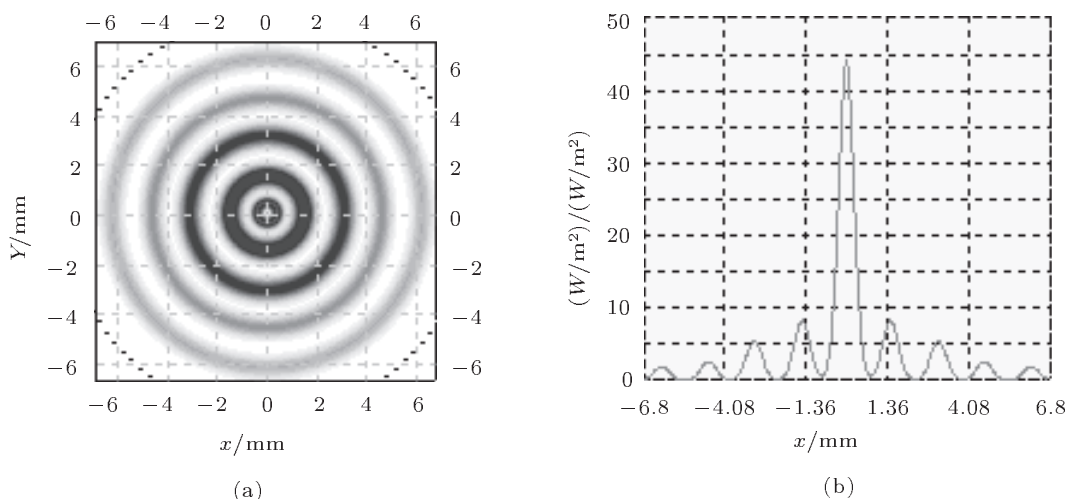


图 3 具有发散角的环状光束产生近似无衍射光的横向光强分布

比较图 1 和图 2, 很容易看到具有发散角的环状光束经过轴棱锥后得到的近似无衍射光束具有更长的无衍射距离. 图 3 是图 2 中探测面处的横向光强分布的二维模拟图, 可以发现该光强分布很好地满足了 Bessel 光强分布.

本文设计的光路如图 4 所示. 光场为 $E_0(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega^2}\right)$ 的高斯光束经过轴棱锥 A_1 后得到近似无衍射 Bessel 光, 轴棱锥 A_1 的透过率函数

为 $t(r) = \exp(-ik(n-1)\gamma_1 r)$. 利用柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式可得到 Σ_1 面上即入射到透镜 L 的光场为

$$E(r_1, d_1) = \left(\frac{-ik}{d_1}\right) \exp(ikd_1) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2d_1}\right) \times \int_0^a \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega^2}\right) J_0\left(\frac{kr_1\rho}{d_1}\right)$$

$$\times \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2d_1} - ik(n-1)\gamma_1\rho\right)\rho d\rho, \quad (1)$$

其中积分上限 a 为入射到轴棱锥 A_1 上的光束半径大小. 利用稳相对 (1) 式进行化简, 得:

$$E(r_1, d_1) = (-ik)\sqrt{\lambda d_1}(n-1)\gamma_1 J_0[kr_1(n-1)\gamma_1] \times \exp(ikd_1) \exp\left(-\frac{[d_1(n-1)\gamma_1]^2}{\omega^2}\right) \times \exp\left(-\frac{ikd_1[(n-1)\gamma_1]^2}{2}\right). \quad (2)$$

透镜 L 的传输矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$, 轴棱锥 A_2

与透镜 L 的距离为 d , 其传输矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则

从 Σ_1 面到 Σ_2 面的传输矩阵为 $M = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{d}{f} & d \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$. 利用柱坐标系下的广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式可得 Σ_2 面上即入射到轴棱锥 A_2 的光场为

$$E(r_2, d) = \left(\frac{-ik}{d}\right) \exp(ikd) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2d}\right) \times \int_0^b J_0(k_1r_1) J_0\left(\frac{kr_1r_2}{d}\right) \times \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2d} - \frac{ikr_1^2}{2f}\right) r_1 dr_1, \quad (3)$$

其中, 积分上限 b 为入射到透镜 L 上的光束半径大小. 轴棱锥 A_2 的透过率函数为 $t(r) = \exp(-ik(n-1)\gamma_2r)$, 则轴棱锥 A_2 后的光场为

$$E(r, z) = \left(\frac{-ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right)$$

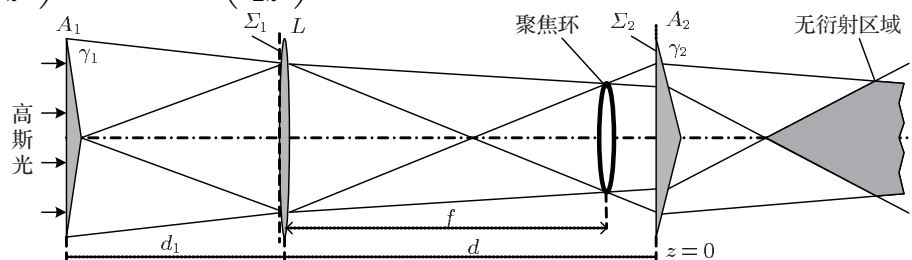


图4 产生长距离近似无衍射光的光路图

$$\times \int_0^R E(r_2, d) J_0\left(\frac{kr_2r}{z}\right) \times \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z} - ik(n-1)\gamma_2r_2\right) r_2 dr_2, \quad (4)$$

其中, 积分上限 R 为入射到轴棱锥 A_2 上的光束半径大小. 所以, 轴棱锥 A_2 后的光强分布函数为

$$I(r, z) = \left[\left(\frac{-ik}{z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \times \int_0^R E(r_2, d) J_0\left(\frac{kr_2r}{z}\right) \times \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z} - ik(n-1)\gamma_2r_2\right) r_2 dr_2 \right]^2. \quad (5)$$

利用 Mathcad 对 (5) 式进行模拟. 选取相应参数, 令 $\gamma_1 = 0.5^\circ$, $\gamma_2 = 1^\circ$, $f = 150 \text{ mm}$, $d = 800 \text{ mm}$, $d_1 = 600 \text{ mm}$, 轴棱锥折射率 $n = 1.516$. 分别模拟 $z = 2 \text{ m}$, $z = 5 \text{ m}$, $z = 10 \text{ m}$, $z = 20 \text{ m}$, $z = 50 \text{ m}$, $z = 80 \text{ m}$ 处的横向光强分布和对应的三维光强分布, 如图 5 和图 6 所示.

从图 5 和图 6 中不难发现, 当光束传播至距离轴棱锥 A_2 80 m 处时, 其横向光强分布依然满足近似无衍射光的光强分布, 只是由于入射的环状光束具有一定的发散角, 所以远距离的近似无衍射光也会有一定的发散^[23], 具体体现在中心光斑半径变大, 中心光强减弱.

3 实验分析

为了验证理论分析, 我们设计了相关实验. 实验光源是功率为 90 mW, 输出主波长为 532 nm 的绿光半导体激光器. 利用焦距分别为 $f_1 = 15 \text{ mm}$ 和 $f_2 = 190 \text{ mm}$ 的两个聚焦透镜组成的望远镜系统将光源发出的光扩束准直成为近似平行光, 再射入到图 1 所示的光学系统. 两个轴棱锥 A_1

和 A_2 的底角分别为 $\gamma_1 = 0.5^\circ$, $\gamma_2 = 1^\circ$; 聚焦透镜焦距 $f = 150 \text{ mm}$; A_1, L, A_2 间相应的距离仍然取 $d = 800 \text{ mm}$, $d_1 = 600 \text{ mm}$, 轴棱锥折射率 $n = 1.516$. 再利用体式显微镜观察轴棱锥 A_2

后不同距离处的光强分布, 并拍下光斑图, 如图 7 所示. 在图 7 的拍摄过程中, 为了获得最好的拍摄效果, 我们在不同距离处对光斑采用不同倍数的放大.

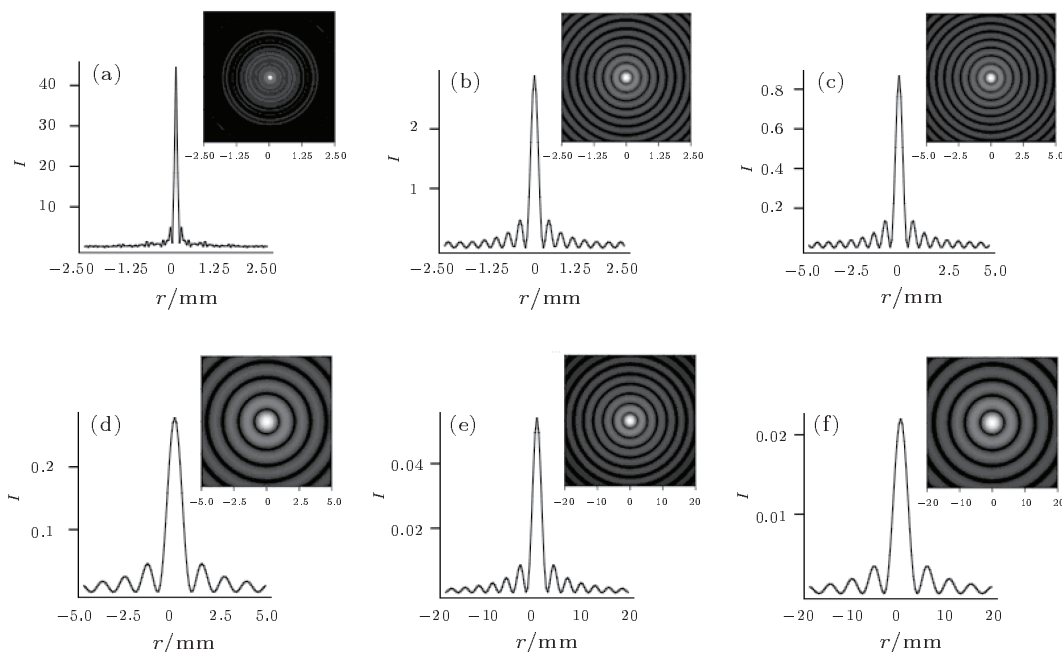


图 5 不同距离处横向光强二维分布图 (a) $z = 2 \text{ m}$; (b) $z = 5 \text{ m}$; (c) $z = 10 \text{ m}$; (d) $z = 20 \text{ m}$; (e) $z = 50 \text{ m}$; (f) $z = 80 \text{ m}$

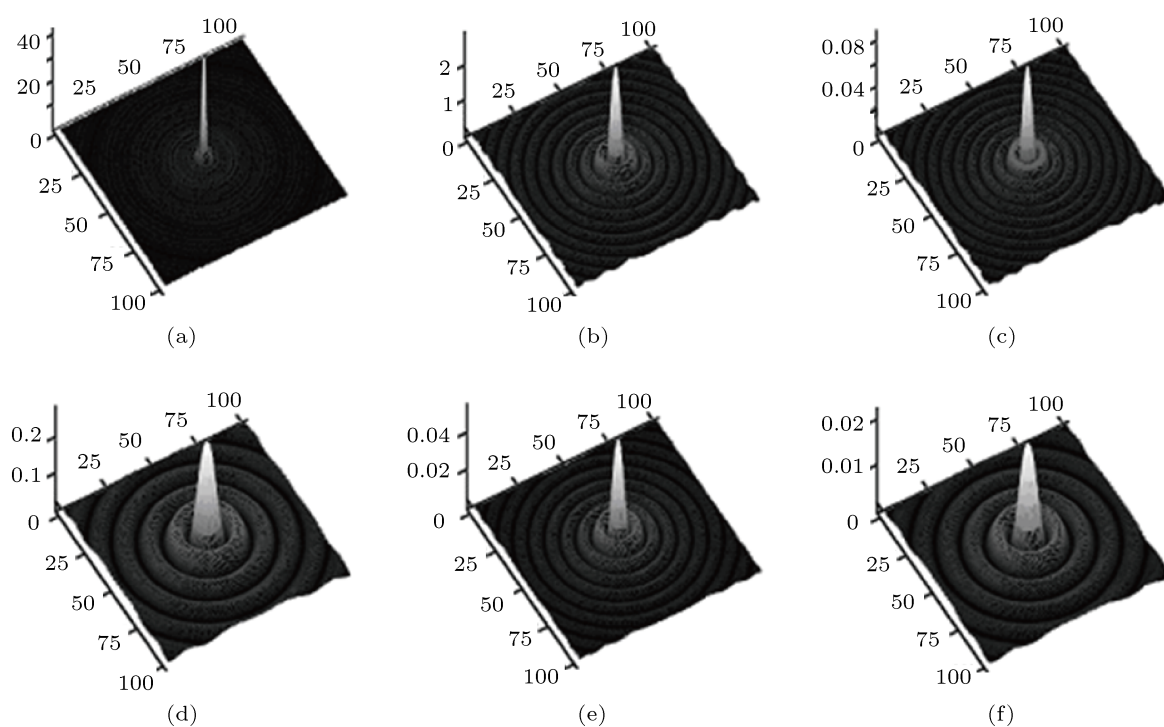


图 6 不同距离处横向光强三维分布图 (a) $z = 2 \text{ m}$; (b) $z = 5 \text{ m}$; (c) $z = 10 \text{ m}$; (d) $z = 20 \text{ m}$; (e) $z = 50 \text{ m}$; (f) $z = 80 \text{ m}$

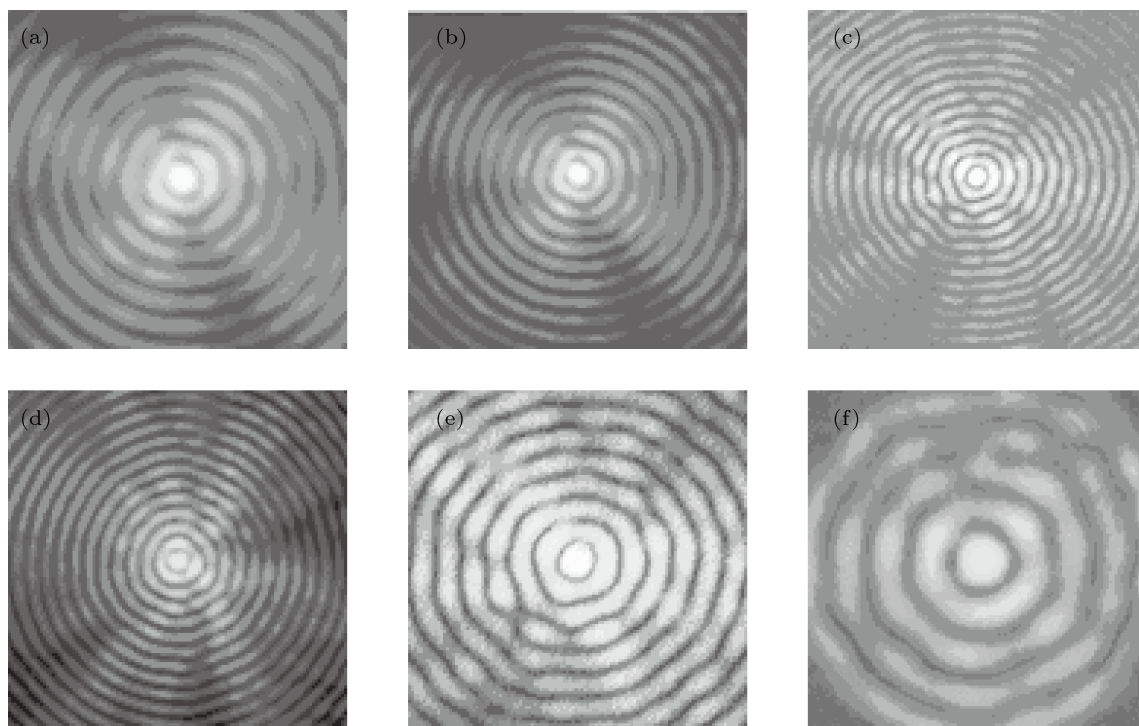


图7 实验拍得的不同距离处的横向光斑图 (a) $z = 2$ m; (b) $z = 5$ m; (c) $z = 10$ m; (d) $z = 20$ m; (e) $z = 50$ m; (f) $z = 80$ m

图 8(a) 中的测量工具是最小刻度为 $20\ \mu\text{m}$ 的测微尺, 图 8(b) 中的测量工具是最小刻度为 $1\ \text{mm}$ 的普通刻度尺. 由图 8 可知, 当 $z = 0.5\ \text{m}$ 时中心光斑直径约为 $0.24\ \text{mm}$, 当 $z = 80\ \text{m}$ 时中心光斑直径约为 $20\ \text{mm}$, 由简单的计算可得该近似无衍射光束发散角约为 $0.12\ \text{mrad}$. 2010 年 Belyi 等^[21] 的研究结果显示, 获得的近似无衍射光束在 $z =$

$0.9\ \text{m}$ 时整个光斑直径为 $30\ \text{mm}$, 在 $z = 6.4\ \text{m}$ 时整个光斑直径为 $60\ \text{mm}$, 即该光束的发散角约为 $2.73\ \text{mrad}$. 比较可知, 文献 [21] 获得的近似无衍射光束发散角比本实验获得的近似无衍射光束发散角大 20 多倍. 也就是说, 我们得到的近似无衍射光虽然具有一定的发散角, 但其发散角相对较小.

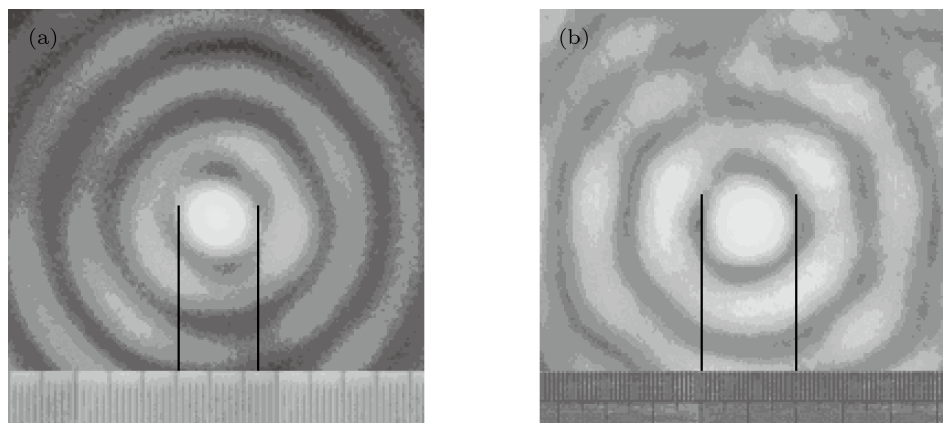


图8 不同距离处中心光斑 (a) $z = 0.5\ \text{m}$; (b) $z = 80\ \text{m}$

4 结论

本文对产生传播距离长且光束质量好的近似无衍射光束的一种新技术进行了阐述,分别从几何光学和衍射理论两个角度对该方法的原理进行了分析.利用软件模拟出了所获得的光束在不同距离

的横向光强二维和三维分布,直观地再现了该近似无衍射光束的传播过程.在实验中获得了传播距离长达 80 m 的近似无衍射光束,并拍摄了该光束在不同距离处的横向光斑图,对理论分析进行了验证.本研究对近似无衍射光束在定向、测距、准直等方面的应用具有积极的意义.

-
- [1] Durnin J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1499
 - [2] Durnin J 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 651
 - [3] Hwang C Y, Kim K Y, Lee B 2011 *Opt. Exp.* **19** 7356
 - [4] Wu F T, Jiang X G, Liu B, Qiu Z X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3125 (in Chinese) [吴逢铁, 江新光, 刘彬, 邱振兴 2009 物理学报 **58** 3125]
 - [5] Cheng C J, Chern J L 2010 *Opt. Commun.* **283** 4892
 - [6] Victor A, David S, Ulises R 2009 *Opt. Lett.* **34** 1456
 - [7] Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T, Pu J X 2011 *Sci. China G Phys. Mech. Astron.* **41** 1131 (in Chinese) [张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 蒲继雄 2011 中国科学 G 辑 **41** 1131]
 - [8] Ma B T, Wu F T, Ma L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6213 (in Chinese) [马宝田, 吴逢铁, 马亮 2010 物理学报 **59** 6213]
 - [9] Chen B S, Pu J X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1033
 - [10] Scott G, McArdie N 1992 *Opt. Eng.* **31** 2640
 - [11] Jaroszewicz Z, Dopazo J F R, Gomez-Reino C 1996 *Appl. Opt.* **35** 1025
 - [12] Turunen J, Vasara A, Friberg A T 1988 *Appl. Opt.* **27** 3959
 - [13] Vasara A, Tutunen J, Friberg A T 1989 *J. Opt. Soc. Am. A* **6** 1748
 - [14] Burvall A, Kolacz K, Jaroszewicz Z 2004 *Appl. Opt.* **43** 4838
 - [15] Sochacki J, Kolodziejczyk A, Jaroszewicz Z, Bara S 1992 *Appl. Opt.* **31** 5326
 - [16] Staronski L R, Sochacki J, Jaroszewicz Z, Kolodziejczyk A 1992 *J. Opt. Soc. Am. A* **9** 2091
 - [17] Wu F T, Chen Y B, Guo D D 2007 *Appl. Opt.* **46** 4943
 - [18] Ma B T, Wu F T, Lu W H, Pu J X 2010 *Opt. Laser Tech.* **42** 941
 - [19] 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]
 - [20] Zhao B, Li Z, Huang X D 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 707 (in Chinese) [赵斌, 李柱, 黄德修 1998 光学学报 **18** 707]
 - [21] Belyi V, Forbes A, Kazak N 2010 *Opt. Exp.* **18** 1966
 - [22] Chavez-Cerda S, New G H C 2000 *Opt. Commun.* **181** 369
 - [23] Liu L, Wu F T 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 370 (in Chinese) [刘岚, 吴逢铁 2008 光学学报 **28** 370]

A new technique for generating non-diffracting beam with long propagation distance using two axicons*

Zheng Wei-Tao Wu Feng-Tie[†] Zhang Qian-An Cheng Zhi-Ming

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

(Received 16 October 2011; revised manuscript received 16 November 2011)

Abstract

A new technique for generating quasi non-diffracting beam with long propagation distance by using simple optical elements including the convergent lens and axicons is proposed. The theory of generating such a beam is studied with geometrical optics and diffraction theory. The formation process of the beam is simulated, and the transverse intensity distributions at various distances are obtained. The simulation results show that the transverse intensity distribution at long-distance accords with Bessel distribution. A comparison between the quasi non-diffracting beam, which is obtained by our experiment, and that in the literature (Belyi et al. 2010 *Opt. Exp.* **18** 1966) shows that its propagation distance is more than 50 m longer, and the beam divergence angle is compressed by 22 times. In the experiment, the beam patterns are captured at different propagation positions, and the obtained results are in good agreement with the theoretical analyses.

Keywords: quasi non-diffracting beam with long propagation distance, convergent lens, axicon

PACS: 42.15.Eq, 42.25.-P, 42.25.Bs, 42.25.Fx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977068, 61178015), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J01278), and the Science and Technology Key Project of Quanzhou City, China (Grant No. 2011G9).

[†] E-mail: fengtie@hqu.edu.cn