

线性径向梯度折射率透镜产生贝塞尔光

孙 川 何艳林 陈 婧 吴逢铁

华侨大学信息科学与工程学院,福建省光传输与变换重点实验室,福建 厦门 361021

摘要 提出了一种产生长距离、高质量贝塞尔光束的新型光学元件——线性径向梯度折射率透镜(LRGIL)。从几何光学角度和衍射积分理论分析了LRGIL产生贝塞尔光束的原理,用软件进行模拟,得出LRGIL具有传统轴棱锥功效的结论。用Math CAD模拟LRGIL产生长距离贝塞尔光束,得出变化LRGIL的厚度和折射率曲线参数容易改变其产生光束的无衍射距离,并得到了无衍射距离大于3 m的贝塞尔光束。此外,LRGIL还有诸多优点,如不易损坏,更加灵活等,在实验和生产中拥有极大的开发潜力。

关键词 激光光学;线性梯度折射率;贝塞尔光束;径向梯度折射率;轴棱锥

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802002

Bessel Beam Generated by Linear Radial Gradient-Index Lens

Sun Chuan He Yanlin Chen Jing Wu Fengtie

Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A new optical component named linear radial gradient-index lens (LRGIL) for generating Bessel beams with long non-diffracting distance and high beam quality is proposed. Based on the geometrical optics and the diffraction integral theory, the principle of LRGIL generating Bessel beams is analyzed. Using Math CAD to simulate the beam propagation process, LRGIL has the function of traditional axicons and the diffraction-free distance of the Bessel beam is variable with the thickness and the gradient index of LRGIL. A long diffraction-free distance up to 3 m is also obtained in the simulation. Besides, LRGIL has other advantages such as more durable and flexible, it has great potential applications in experiment and production.

Key words laser optics; linear gradient index; Bessel beam; radial gradient index

OCIS codes 080,3095; 080,3630; 080,1510; 050,1960

1 引 言

Bessel光束^[1]自从被Durnin等^[2]于1987年提出后,一直受到广泛关注。贝塞尔光束在传输领域中拥有着独特的性质,如其中心光斑极小,中心光强极大,在一定范围内不分散,遇到障碍物会自重建^[3]等,使得贝塞尔光束在光学成像^[4]、光学拉力^[5]、光学引导^[6]、粒子囚禁^[7]、光学扳手^[8]、生物细胞成像^[9]、光纤传输^[10]等众多领域得到应用。轴棱锥法^[11-13]是实验中产生贝塞尔光束的常用方法,轴棱锥法比衍射法和环缝透镜法^[14]操作性更强、能量转换效率更高、光束质量更好,但是,轴棱锥法产生贝塞尔光束的无衍射距离大小由其底角决定,由于加工困难,轴棱锥底角无法做得很小(0.5°已经非常小了^[15]),这就限制了贝塞尔光束的无衍射距离的增大,而且轴棱锥的中心锥角在操作中极易受到损坏,变成圆顶轴棱锥,使得光束质量大减,影响实验结果。

提出了一种产生长距离、高质量贝塞尔光束的新元件——线性径向梯度折射率透镜(LRGIL),能在一定程度上缓解上述问题。LRGIL选用径向梯度折射率材料,折射率沿径向线性变化使得LRGIL拥有类似轴棱

收稿日期:2015-01-04;收到修改稿日期:2015-03-26

基金项目:国家自然科学基金(61178015)、福建省科技创新平台计划项目(2012H2002)、泉州市科技重点项目(2014Z127,2012Z97)

作者简介:孙 川(1989—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与变换等方面的研究。E-mail: sch_789@163.com

导师简介:吴逢铁(1958—),男,博士,教授,主要从事光束传输与变换、短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

锥的线聚焦效果,透过 LRGIL 的光束被线聚焦便会产生贝塞尔光束。LRGIL 表面是平面,不存在磨损后变成圆顶轴棱锥的问题;设定材料厚度和折射率变化参数可以控制产生贝塞尔光束的无衍射距离,理论上,LRGIL 可以获得在光轴上无衍射距离更长的贝塞尔光束。从几何光学和衍射积分两个角度对 LRGIL 的原理进行分析,用 Math CAD 软件进行模拟,模拟结果和理论分析一致。

2 原理分析

2.1 元件设计

轴棱锥与 LRGIL 结构和几何分析如图 1 所示。图 1(a)中轴棱锥是一个圆锥体透镜,内部折射率均匀,底角较小。图 1(b)中 LRGIL 是平面透镜,内部折射率沿径向线性变化。

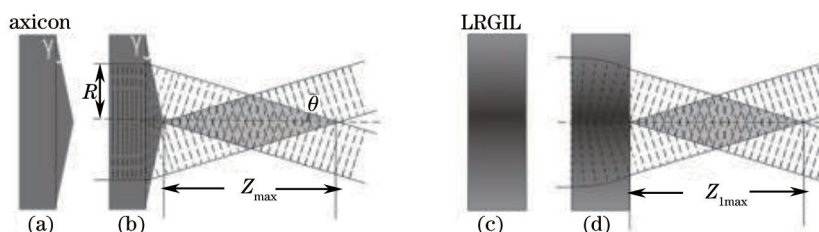


图 1 轴棱锥和 LRGIL 的结构与几何分析图

Fig.1 Scheme and optics principle of axicon and LRGIL

平行光入射轴棱锥和 LRGIL 的几何分析如图 1(b)、(d)所示,棱形区域为贝塞尔光束的无衍射范围。图 1(b)中轴棱锥不同径向距离处厚度不同,导致出射光束的相位改变不同,等相位面发生偏转,产生贝塞尔光束。图 1(d)中 LRGIL 厚度均匀,但折射率随距轴心距离的变化发生线性改变,不同位置处出射光束的相位改变不同,其等相位面相互重叠产生无衍射光束。

图 1(b)中,由几何光学知,平行光入射轴棱锥出射光束的会聚角为 $\theta \approx (n-1) \cdot \gamma$,代入 $Z_{\max} \approx R/\theta$,得到轴棱锥法产生贝塞尔光束的最大无衍射距离公式^[2,11]:

$$Z_{\max} \approx \frac{R}{(n-1) \cdot \gamma}, \quad (1)$$

式中 n 为轴棱锥折射率, γ 为轴棱锥底角, R 为平行光入射半径。

2.2 衍射理论分析

轴棱锥的振幅透过率为

$$t(r) = \exp[-i \cdot k \cdot (n-1) \cdot \gamma \cdot r]. \quad (2)$$

LRGIL 对振幅的相位改变为

$$\varphi(r) = k \cdot D \cdot [\tilde{n}(r) - 1], \quad (3)$$

式中 k 为波矢, D 为 LRGIL 的厚度, $\tilde{n}(r)$ 为 LRGIL 的折射率函数,使用径向线性变化的折射率材料, $\tilde{n}(r) = n_0 - g \cdot r$, n_0 为透镜中心位置处的折射率, g 为与折射率曲线有关的参数。将 $\tilde{n}(r)$ 代入(3)式,得到相位改变公式 $\varphi(r) = k \cdot D \cdot (n_0 - 1) - k \cdot D \cdot g \cdot r$,去除与变量 r 无关的常数项,经过整理,得到 LRGIL 的振幅透过率:

$$t_1(r) = \exp(-i \cdot k \cdot g \cdot D \cdot r). \quad (4)$$

平面波入射轴棱锥,出射光束的振幅表达式为 $U_0(r) = t(r)$,在自由空间内传播的柯林斯公式为

$$U(\rho, z) = \frac{k}{i \cdot z} \cdot \exp\left[i \cdot k \cdot \left(z + \frac{\rho^2}{2 \cdot z}\right)\right] \cdot \int_0^R U_0(r) J_0\left(\frac{k \cdot \rho \cdot r}{z}\right) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k \cdot r^2}{2z}\right) \cdot r \cdot dr. \quad (5)$$

将 $U_0(r) = t(r)$ 与振幅透过率 $t_1(r)$ 代入(5)式,又知光强 $I(\rho, z) = |U(\rho, z)|^2$,经整理得平行光通过 LRGIL 的近轴光强表达式:

$$I_1(\rho, z) = \frac{k^2}{z^2} \cdot \left| \int_0^R J_0\left(\frac{k \cdot \rho \cdot r}{z}\right) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k \cdot r^2}{2z} - i \cdot k \cdot D \cdot g \cdot r\right) \cdot r \cdot dr \right|^2. \quad (6)$$

3 数值模拟

3.1 LRGIL产生贝塞尔光束

依据(6)式,用Math CAD软件进行仿真模拟。波长 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$,平行光入射半径 $R=2.5\ \text{mm}$;LRGIL厚度 $D=1\ \text{mm}$ 。取 $g=0.008$,对LRGIL产生贝塞尔光束的光强分布进行模拟。

从图2可以明显看出,随传播距离 z 从80 mm增加到320 mm,LRGIL产生贝塞尔光束的中心光斑尺寸基本不变,光强分布图样大致相同,在 $z=320\ \text{mm}$ 处光束质量还有所增加。模拟结果证实LRGIL与轴棱锥有着相同的线聚焦作用,都可以产生贝塞尔光束,LRGIL具有传统轴棱锥的功效。

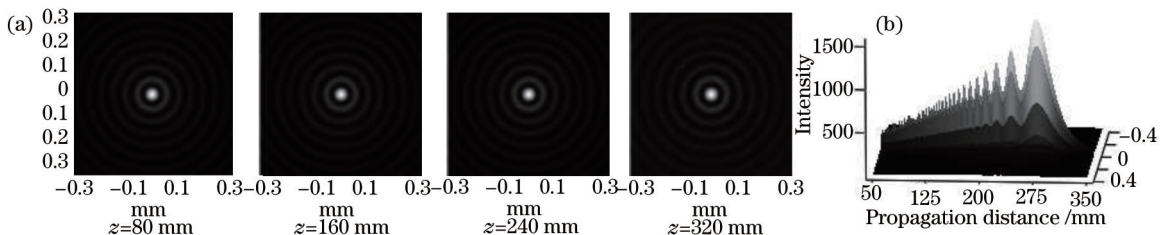


图2 LRGIL产生贝塞尔光束的光强分布。(a)截面光强分布;(b)沿光轴方向光强分布

Fig.2 Intensity distribution of Bessel beam generated by LRGIL. (a) Transverse intensity distribution; (b) axial intensity distribution

3.2 LRGIL产生长距离贝塞尔光束

由2.1节可知,LRGIL的等效几何模型为轴棱锥,令(2)式等于(4)式,整理后得到使LRGIL和轴棱锥具有相同线聚焦作用的公式:

$$g \cdot D = (n - 1) \cdot \gamma \tag{7}$$

将(7)式代入(1)式,得到LRGIL产生贝塞尔光束的最大无衍射距离公式:

$$Z_{\max} \approx \frac{R}{g \cdot D} \tag{8}$$

令 $R=2.5\text{mm}$,取不同的 g 值和 D 值,代入(8)式中,并用Math CAD软件模拟,得到不同 g 、 D 参数下LRGIL产生贝塞尔光束的轴向分布模拟图(见图3)和最大无衍射距离的理论值与模拟值比较图(见图4)。

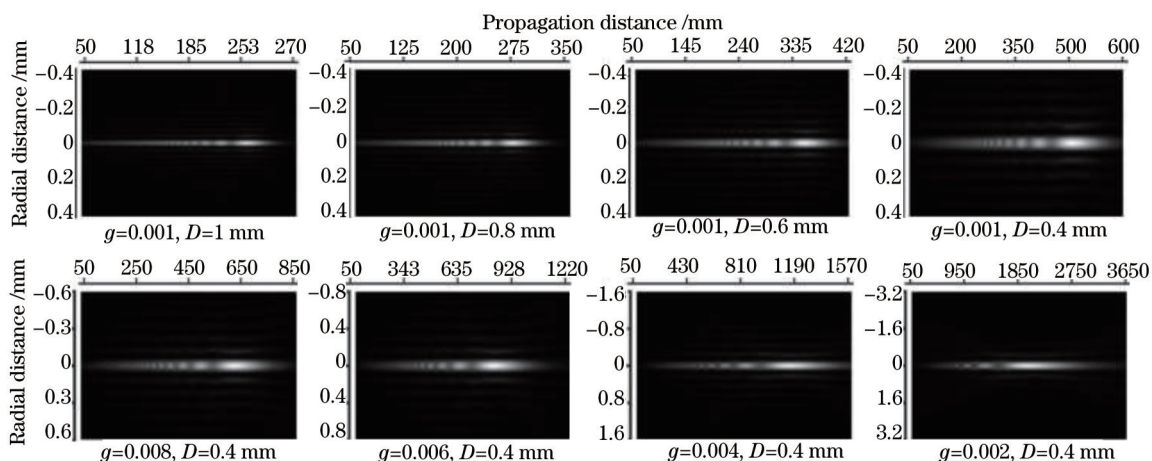


图3 LRGIL在不同 g 、 D 参数下产生的贝塞尔光束轴向光强分布

Fig.3 Axial intensity distribution of Bessel beam generated by LRGIL with different g , D parameters

由图3和图4可以看出,减小LRGIL的厚度 D 和参数 g 均能增大其产生贝塞尔光束的无衍射范围,图3最后一组参数($g=0.002, D=0.4\ \text{mm}$)下的LRGIL更是产生了无衍射距离大于3 m的贝塞尔光束,模拟值与理论值基本吻合。

作为比较,对传统轴棱锥法产生贝塞尔光进行相关计算。取 $R=2.5\ \text{mm}$, $n=1.45$,模拟不同底角值 γ 下贝塞尔光束最大无衍射距离的理论值与模拟值,如图5所示。

由图5可以看出,轴棱锥产生贝塞尔光束的最大无衍射距离理论值与模拟值相当吻合,底角等于 0.5° 的轴棱锥在轴上最大产生636 mm的贝塞尔光束。受到表面加工工艺的限制,实际中轴棱锥产生的贝塞尔光束在光轴上一般只能拥有1 m以内的无衍射距离,而LRGIL没有这方面的限制,设定合适的参数,LRGIL可

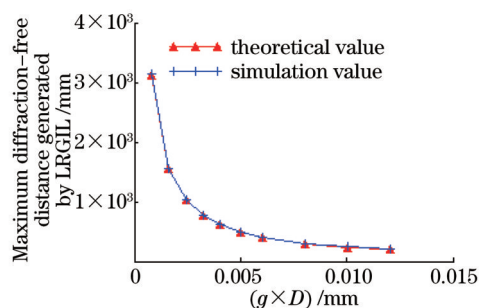


图4 LRGIL产生贝塞尔光束最大无衍射距离的理论值与模拟值

Fig.4 Theoretical value and simulation of maximum diffraction-free distance of Bessel beam generated by LRGIL

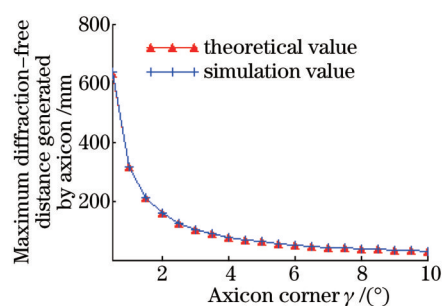


图5 轴棱锥产生贝塞尔光束最大无衍射距离的理论值与模拟值

Fig.5 Theoretical value and simulation of maximum diffraction-free distance of Bessel beam generated by axicon

轻易产生无衍射距离长达数米的贝塞尔光束。

4 结 论

基于轴棱锥中光的传输原理提出了产生长距离、高质量贝塞尔光束的新元件——LRGIL。LRGIL不但具有轴棱锥的功效,更是拥有许多轴棱锥不具备的优点,如更抗磨损、更长无衍射距离、更加灵活,是实验和生产中产生贝塞尔光束更有效的新方法,拥有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Lu Xuanhui, Chen Xumin, Zhang Lei, *et al.*. High-order Bessel-Gaussian beam and its propagation properties[J]. Chin Phys Lett, 2003, 20(12): 2155-2157.
- 2 Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1499-1501.
- 3 Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao, *et al.*. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gaussian beam[J]. Sci Sin Phys, 2011, 41(10): 1131-1137.
张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. 中国科学, 2011, 41(10): 1131-1137.
- 4 Craig Snoeyink, Steve Wereley. Single-image far-field subdiffraction limit imaging with axicon[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 625-627.
- 5 Chen J, Ng J, Lin Z F, *et al.*. Optical pulling force[J]. Nature Photonics, 2011, 5(9): 531-534.
- 6 Tatarkova S A, Sibbett W, Dholakia K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(3): 038101.
- 7 Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810-816.
- 8 MacDonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, *et al.*. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- 9 Thomas A Planchon, Liang Gao, Daniel Milkie, *et al.*. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination[J]. Nature methods, 2011, 8(5): 417-423.
- 10 Zhang Xia, Su Xiaofei, Zhang Lei, *et al.*. Analysis of orbital angular momentum modes based on high-order Bessel functions in optical fiber of ring refractive index distribution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205002.
张霞, 宿晓飞, 张磊, 等. 折射率环状分布光纤中基于高阶贝塞尔函数的轨道角动量模式分析[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205002.
- 11 Wu Fengtie, Cheng Zhiming, Wang Tao, *et al.*. Analysis of phase on axis of the Bessel beam and self-imaged bottle beam[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0326001.
吴逢铁, 程治明, 王涛, 等. 贝塞尔光束和自成像局域空心光束的轴上相位分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0326001.
- 12 Fang Xiang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming. Effects of Incoherent monochrome LED light source on the formation of Bessel beam[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0205001.
方翔, 吴逢铁, 程治明. 非相干单色LED光源对贝塞尔光束形成的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0205001.
- 13 Du Tuanjie, Wang Tao, Wu Fengtie. Generation of three-dimensional optical bottle beams via focused non-diffracting Bessel beam using an axicon[J]. Optics Communications, 2014, 317(8): 24-28.

- 14 J C Gutiérrez-Vegaa, M D Iturbe-Castilloa, G A Ramírez, *et al.*. Experimental demonstration of optical Mathieu beams[J]. *Optics Communications*, 2001,195(1-4): 35~40
- 15 Zhang Qian'an, Wu Fengtie, Zheng Weitao. Design of aspherical lens for generating non-diffracting Bessel beams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1315-1318.
- 张前安, 吴逢铁, 郑维涛. 无衍射贝塞尔光束非球面透镜设计[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1315-1318.

栏目编辑: 张 雁