



论文

绿光 LED 产生无衍射 Bessel 光束

程治明, 吴逢铁*, 范丹丹, 方翔

华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021

*联系人, E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

收稿日期: 2011-12-16; 接受日期: 2012-03-16; 网络出版日期: 2012-06-18

国家自然科学基金(批准号: 60977068, 61178015)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金(编号: SG001102)和泉州市科技重点项目(编号: 2011G9)资助

摘要 采用单色 LED 光源得到较理想的近似无衍射 Bessel 光束. 文中从 LED 光源的时空相干性出发分析用单色 LED 灯珠产生 Bessel 光束的可能性, 利用光阑提高光场的空间相干性得以实现. 设计实验光学系统, 让 LED 光源发出的光经过一套光学系统后透过轴棱锥, 得到了近似 Bessel 光束, 光束中心亮斑大小及最大无衍射距离均与理论计算所得相符, 证明用 LED 光源也能够产生较理想的近似 Bessel 光束. 最后讨论了光阑孔径对所产生 Bessel 光束质量的影响, 发现光阑孔径增大时所得 Bessel 光束强度变大但截面光强明暗对比度下降.

关键词 Bessel 光束, LED 光源, 轴棱锥**PACS:** 42.25.Fx, 42.25.Hz, 42.15.Eq, 42.25.-p**doi:** 10.1360/132011-1257

无衍射光束由 Durnin^[1]于 1987 年首次提出, 其光场分布具有第一类零阶 Bessel 函数 J_0 的形式, 因此又称 Bessel 光束. 这种光束最大的特性是在自由空间传播时, 中心光斑大小不会随着传播距离而改变, 并且中心光强极高、遇到障碍物能够重建^[2,3], 这些特性使得 Bessel 光束被应用在广泛领域, 如粒子囚禁^[4]、粒子的光学引导^[5]、统计物理^[6]和原子光学^[7]以及最近提出的光学拉力等^[8]. 理想的 Bessel 光束对应无限大的能量, 这在实际中是不可能得到的, 不过实验中可以得到近似的无衍射 Bessel 光束, 采用环缝法^[1,9]、球差透镜^[10]、计算机全息法^[10,11]、轴棱锥法等均能实现^[12,13], 使得 Bessel 光束的应用成为现

实, 人们对 Bessel 光束的兴趣被进一步提高.

激光因具有良好的相干性和光束质量而倍受青睐, 在产生 Bessel 光束的实验中也是如此, 产生的 Bessel 光束能够与理论计算所得参数很好地符合. 近年来国外已有学者开始用非相干光源来产生 Bessel 光束并取得一定成果^[14–16], 所得的 Bessel 光束同样可以用于粒子囚禁和光学引导^[17]. 宽频带 Bessel 光在光学相干断层扫描成像(OCT)中能够提高图像的分辨率^[18], 用部分干光产生 Bessel 光束具有现实意义. LED 作为一种新型固态光源, 具有节能、环保、寿命长、可靠耐用、响应时间快和高显色性等诸多优点, 而且随着相关研究工作的开展, 其发光效率已接近

引用格式: 程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 等. 绿光 LED 产生无衍射 Bessel 光束. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 805–811

Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, et al. Non-diffraction bessel-like beam generated by green LED source (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 805–811, doi: 10.1360/132011-1257

甚至超过了高压钠灯、金卤灯等气体放电灯. LED 造价低廉, 极易获得, 有着独特的市场优势. 凭借着迅猛的发展势头, 如果能够用 LED 产生 Bessel 光束, 将可能把 Bessel 光束的研究与使用推向另一个高潮. 单色 LED 具有较好的时间相干性, 通过光阑等光学元件的处理又可以使其空间相干性得到改善, 因此我们采用这种准相干光来进行实验. 实验所得的最大无衍射距离及中心光斑直径均与理论符合, 成功地用 LED 得到了较理想的近似 Bessel 光束. 与国外学者 Fischer 等人^[19]近年用时间相干性更好的光源——超辐射发光二极管(SLD) 所得的研究成果相比, 我们得到的 Bessel 光束最大无衍射距离更长, 并且光源价格更低, 有很大进步. 文中的最后结合实验结果讨论了光阑孔径对所产生的 Bessel 光束质量影响, 证实随着光阑孔径增大所得 Bessel 光束光强提高, 但截面光强图亮暗对比度下降, 当光阑孔径增大到一定程度时将不能再形成 Bessel 光束.

1 理论分析

LED 的自发辐射发光机制与激光器的受激辐射有着本质的区别, LED 发出的光频谱较宽、没有固定的相位差, 这些因素使得产生的光场相干性极差, 所以一直以来 LED 都被视为非相干光源. 随着技术的发展, 单色 LED 的频谱渐渐地变窄, 图 1 为用积分球测得实验所用的一颗功率为 3 W 的绿光 LED 灯珠频谱图, 测得主波长为 $\lambda=531$ nm, 频谱半峰宽度 $\Delta\lambda=36.0$ nm. 根据参考文献[20]可知时间相干性可由相干长度 L_0 来标量, L_0 越长时间相干性越好. L_0 定义为

$$L_0 \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

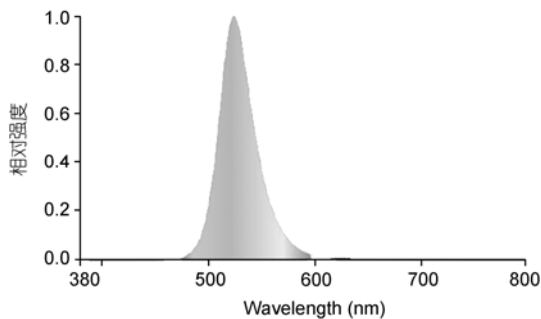


图 1 绿光 LED 频谱图
Figure1 spectrum of green LED.

代入 LED 光谱参量可得 $L_0 \approx 7.8 \mu\text{m}$, 可见该单色绿光 LED 具有一定的时间相干性.

根据空间相干性的反比例公式^[20]

$$\frac{bd}{D} \approx \lambda, \quad (2)$$

其中 b 为光源的横向线度; d 为光场中相干范围的横向线度, 超出该线度的光即可视为非相干光; D 为光源与光阑的间距; λ 为光波的主波长. LED 灯珠的发光面积很小, 实验中采用的绿光 LED 灯珠发光面的横向线度约为 $b=1$ mm. 为提高光场的空间相干性可以在距离 LED 灯珠 D 处加一光阑, 假设光阑直径取 $d=0.1$ mm, 由(2)式可以计算出满足空间相干性反比例公式的条件为

$$D \geq 189 \text{ mm}, \quad (3)$$

即灯珠与光阑间距满足(3)式时, 通过光阑的光场有一定程度的空间相干性.

用轴棱锥产生 Bessel 光束是利用无数平面波相干叠加而形成的, 由以上分析可知单色 LED 光源发出的光经过光阑可提高光场的相干性, 从而使使得用 LED 光源产生 Bessel 光束成为可能.

单波长平行光透过轴棱锥后的光场分布可由柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式和轴棱锥的透过率函数 $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$ 导出^[21]

$$E(r_2, z) = \left(-\frac{ik}{z} \right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z} \right) \times \int_0^R E_0 J_0 \left(\frac{kr_1 r_2}{z} \right) \exp \left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r_1 \right] r_1 dr_1, \quad (4)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, r_1 为轴棱锥入射面的径向坐标; r_2 为接收面的径向坐标; n 为轴棱锥的折射率; γ 为轴棱锥的底角; R 为光束入射轴棱锥的半径. 但 LED 发出的光波并非单波长的, 因此我们先对图 1 中频谱进行分析, 将非单色光分解成不同频率的单色光的线性组合, 取波长间隔 5 nm, 得到各波长对应的相对光强如表 1 示. 结合 Sellmeier 色散公式

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}, \quad (5)$$

其中 B_1, B_2, B_3, C_1, C_2 和 C_3 为 Sellmeier 公式的材料系数, 实验采用的轴棱锥材料为 Fused Silica, 相应系数为

$$\begin{cases} B_1 = 0.6961633, & C_1 = 4.67914826 \times 10^{-3}, \\ B_2 = 0.4079426, & C_2 = 1.3512063 \times 10^{-2}, \\ B_3 = 0.8974900, & C_3 = 9.7934002 \times 10^{-1}. \end{cases} \quad (6)$$

由此轴棱锥后的光场分布应改写为

$$E(r_2, z, \lambda) = \left(-\frac{ik(\lambda)}{z} \right) \exp \left[ik(\lambda) \left(z + \frac{r_2^2}{2z} \right) \right] \times \int_0^R J_0 \left(\frac{k(\lambda)r_1r_2}{z} \right) \times \exp \left\{ \frac{ik(\lambda)r_1^2}{2z} - ik(\lambda)[n(\lambda)-1]r_1 \right\} r_1 dr_1. \quad (7)$$

再将各波长对应的光强分布进行叠加即可得到多波长光波入射轴棱锥所得到光强分布图。

$$I(r_2, z) = \sum_{i=1}^{20} A_i |E(r_2, z, \lambda_i)|^2, \quad (8)$$

其中 A_i 为不同波长对应的相对强度。取参量 $R=1.8$ mm、 $n=1.458$ ，按(7)和(8)式进行模拟仿真，得到光束的轴向光强分布图为近似 Bessel 分布，如图 2 示。光束不同位置处的截面光强分布图如图 3 示，由曲线图可以看出中心两侧波动逐渐变得平缓，对应光强截面图外围环变得模糊。

表 1 不同波长对应的相对光强

Table 1 Relative intensity matched with different wavelengths

波长(nm)	相对强度	波长(nm)	相对强度
485	0.038	535	0.731
490	0.072	540	0.583
495	0.132	545	0.455
500	0.237	550	0.332
505	0.4	555	0.25
510	0.621	560	0.185
515	0.847	565	0.137
520	0.992	570	0.1
525	1	575	0.074
530	0.89	580	0.054

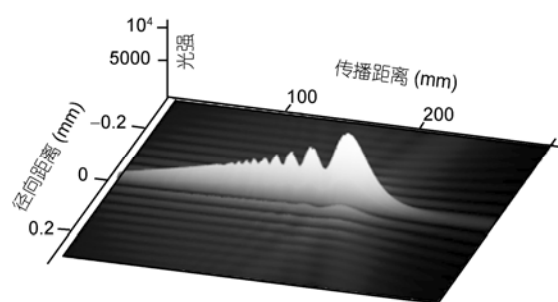


图 2 光强轴向分布图

Figure 2 Intensity distribution along propagation distance.

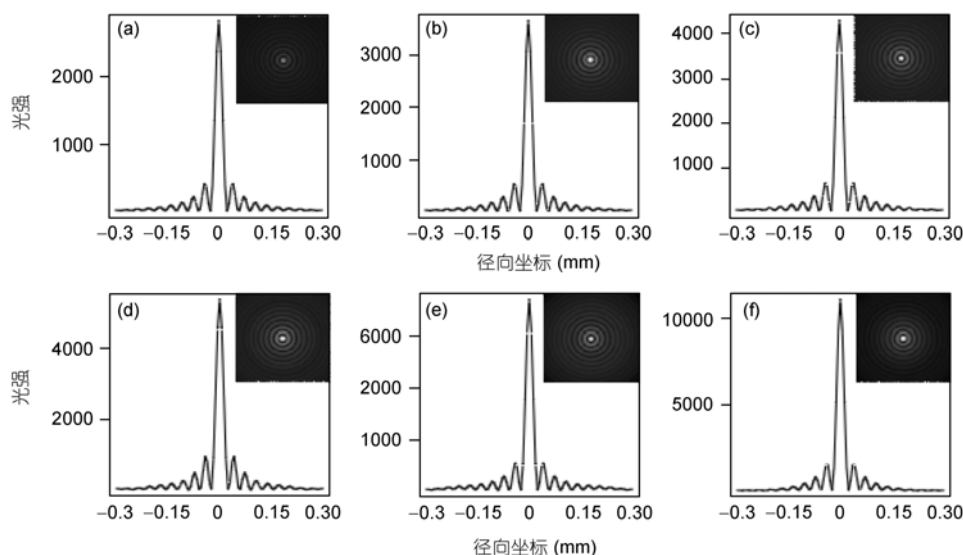


图 3 模拟所得不同位置处的光强截面图

(a) 70 mm; (b) 90 mm; (c) 110 mm; (d) 150 mm; (e) 190 mm; (f) 220 mm

Figure 3 Intensity distribution of cross section at different propagation distance in simulation. (a) 70 mm; (b) 90 mm; (c) 110 mm; (d) 150 mm; (e) 190 mm; (f) 220 mm.

2 实验及结果分析

为提高 LED 光源相干性, 在离光源较远处放一小孔径光阑, 实验装置图如图 4.

由于 LED 灯珠光强分布并非理想的均匀光, 在灯珠与光阑间放置一个锥形的聚光筒, 光源发出的光在筒中经多次反射再通过光阑后的光强会分布得更加均匀. 图 4 中 P 为直径 $d=0.1\text{ mm}$ 的光阑; 光源与光阑间距离 $D=320\text{ mm}$, 满足(3)式的要求; L_1 和 L_2 分别是焦距为 $f_1=15\text{ mm}$ 和 $f_2=190\text{ mm}$ 的凸透镜, 在光路中作为准直扩束系统; 实验采的轴棱锥底角 $\gamma=1^\circ$.

LED 灯珠发出的光经聚光筒聚光再通过光阑 P 后进入由 L_1 和 L_2 构成的准直扩束系统, 得到光强分布较为均匀的平行光, 透过轴棱锥得到近似无衍射 Bessel 光束. 用体视显微镜进行观察, 图 5 为在轴棱锥后不同距离处拍得的光强截面分布图.

从图 5 中可以看出实验成功地在一段距离内得到了近似 Bessel 光束. 图 3 模拟的截面光强分布图所取位置均与实验中的一一对应, 对比图 3 与图 5 可以看出实验与理论较为符合.

实验中测得入射轴棱锥的光束半径 $R \approx 1.8\text{ mm}$, 根据最大无衍射距离公式

$$z_{\max} = \frac{R}{(n-1)\gamma}, \quad (9)$$

可计算出 $z_{\max}=225.18\text{ mm}$, 对照图 5 可知实验所得最大无衍射距离与理论基本符合.

参考文献[19]中用超辐射发光二极管(SLD)及轴棱锥来产生 Bessel 光束, SLD 主波长 $\lambda=830\text{ nm}$, 半峰宽度 $\Delta\lambda=15\text{ nm}$, 相干长度 $L_0=46\text{ }\mu\text{m}$, 比我们采用的单色 LED 光源时间相干性好, 用底角为 5° 的轴棱锥进行实验, 所得 Bessel 光束最大无衍射距离仅 21 mm , 即使换算成与我们同角度的 1° 轴棱锥也只有 105 mm . 而我们用 LED 得到的 Bessel 光束传播两百多毫米后仍保持良好的光束特性, 这是一个很大的进步.

零阶 Bessel 函数的第一零点的自变量为 2.405 , 即 $J_0(2.405)=0$, $J_0(\alpha\rho)=0$. 可得

$$\rho = \frac{2.405}{\alpha} = \frac{2.405}{k(n-1)\gamma}, \quad (10)$$

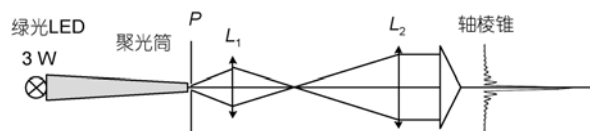


图 4 实验装置图

Figure 4 Experimental set up.

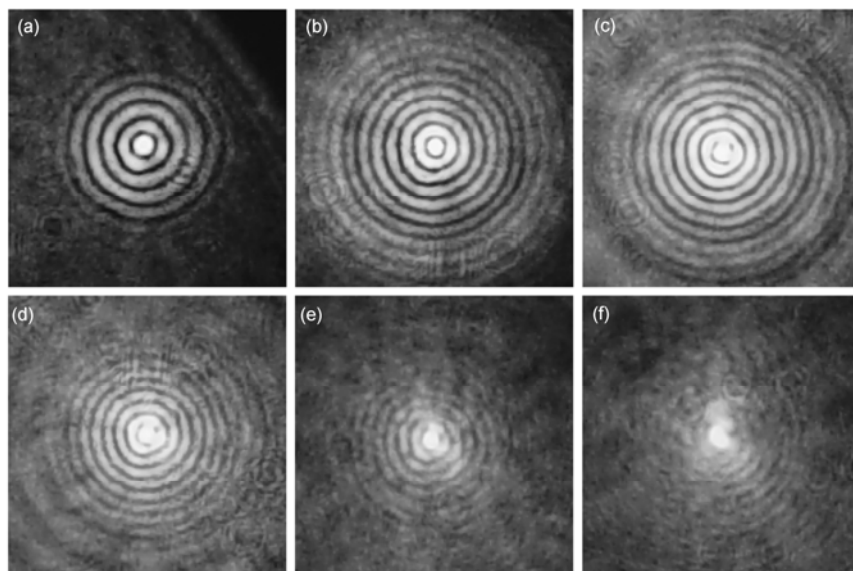


图 5 实验所得不同位置处的光强截面图

(a) 70 mm; (b) 90 mm; (c) 110 mm; (d) 150 mm; (e) 190 mm; (f) 220 mm

Figure 5 Intensity distribution of cross section at different distance in experiment. (a) 70 mm; (b) 90 mm; (c) 110 mm; (d) 150 mm; (e) 190 mm; (f) 220 mm.

即为 Bessel 光束的中心最小亮斑半径, 其中 α 为径向波矢分量, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢. 代入相关参量可得中心亮斑半径 $\rho = 25.43 \mu\text{m}$. 如图 6 对实验所得的光强图中心光斑进行测量, 测量工具是测微尺, 精度为 $10 \mu\text{m}/\text{格}$, 测微尺与光斑在显微镜中按同样的放大倍数放大后拍得. 测得中心亮斑直径约为 $50.1 \mu\text{m}$, 与理论计算十分吻合.

综上所述可知通过提高光场的空间相干性, 单色绿光 LED 能够产生较理想的近似 Bessel 光束, 并且最大衍射距离及中心亮斑直径与理论计算所得十分吻合.

图 7 为用 LED 与激光在相同条件下相同位置 ($z = 90 \text{ mm}$) 产生 Bessel 光束的对比, 其中 (a) 和 (b) 为实验所得, (c) 和 (d) 为模拟图形. 无论从实验还是模拟都可

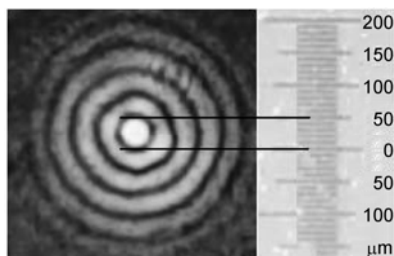


图 6 Bessel 光束中心光斑的测量
Figure 6 Measure of center spot of Bessel beam.

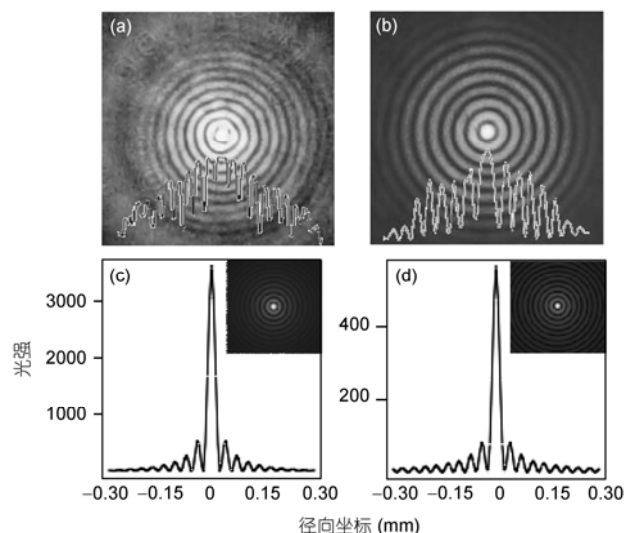


图 7 LED 光源产生 Bessel 光束(a)、激光器产生 Bessel 光束(b)、多波长叠加模拟(c)和单波长模拟(d)

Figure 7 (a) Bessel beam generated by LED; (b) Bessel beam generated by laser; (c) simulation of the multi-wavelength superposition; (d) simulation of a single wavelength.

以看出用 LED 产生的 Bessel 光束截面图由于受相干性差的影响外围环变得模糊, 而用激光器产生的 Bessel 光束外围环仍然清晰可见. 说明宽频带光波对产生 Bessel 光束效果会有影响, 但对中心的几环影响不大. 图 7(a) 中的曲线由于中心亮斑强度达到饱和而呈平顶状, 虽然较理论有所偏差, 但总体上用 LED 光源产生 Bessel 光束得到了较好的结果.

3 光阑孔径对所产生 Bessel 光束质量影响的讨论

LED 光源相干性较差, 在此实验中主要依靠光阑提高其空间相干性才能得到较理想的结果, 因而光阑的孔径大小对实验效果有很大的影响, 我们做了一组实验对此进行考查. 将波长 $\lambda = 531 \text{ nm}$ 、光源发光面积 $b = 1 \text{ mm}$ 、光源与光阑间距 $D = 320 \text{ mm}$ 代入 (2) 式可得相干范围的横向线度为

$$d = 0.169 \text{ mm}, \quad (11)$$

可知当光阑直径 d 超过 0.169 mm 时, 有非相干光场通过光阑. 按图 4 的实验装置改变光阑孔径大小, 在轴棱锥后 70 mm 处拍得截面光强图如图 8. 从图 8 中可以看出:

① 随着光阑孔径的增大, 光强逐渐增强, 但光强亮暗对比度逐渐下降;

② 光阑的横向线度超过 $d = 0.169 \text{ mm}$ 时也能产生近似 Bessel 光束;

③ 光阑增大到一定程度 (0.5 mm) 时, 光束已基本失去 Bessel 光束特性.

现象的原因在于:

① 光阑孔径增大时, 光场通过光阑的能量更强从而亮度增强, 但光场相干性降低, 导致产生的干涉图样对比度下降;

② 光阑孔径虽然超过了光场中相干范围的横向线度, 但通过光阑的光场仍含有相干性较好的部分, 具有一定相干性, 依然能够形成 Bessel 光束;

③ 光阑不断增大, 光场相干性降到足够低, 便不能形成干涉条纹.

光阑孔径增大时入射轴棱锥的光斑随之增大, 理论上产生的 Bessel 光束截面半径也会随之变大、亮环数随之增多, 但实验拍得 Bessel 光束的干涉亮环数并没有明显的增加. 该现象的原因是光阑孔径增大时背景光也增强, 外围亮度较小的亮环被高亮度的

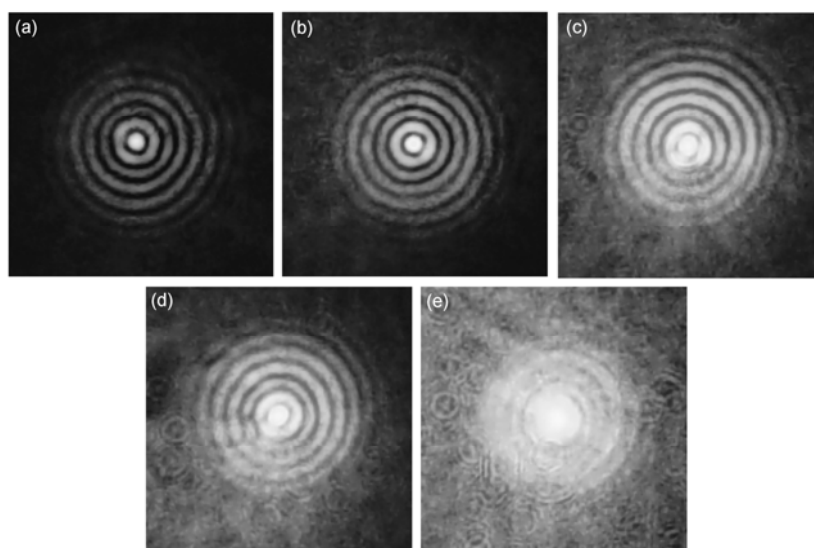


图 8 不同光阑孔径时在 70 mm 处的光强截面图

(a) 0.1 mm; (b) 0.15 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.5 mm

Figure 8 Intensity distribution of cross section at $z=70$ mm generated in different pinhole size. (a) 0.1 mm; (b) 0.15 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.5 mm.

强背景光掩盖.

在实际应用中可以根据不同的需要, 通过调节光阑孔径大小得到不同光强和光强对比度的 Bessel 光束, 对实际应用具有重要的指导意义.

4 结论

本文对单色 LED 光源的时空相干性进行了讨论, 得知单色 LED 光场通过用光阑提高空间相干性便有

产生 Bessel 光束的可能性. 随后用实验进行验证, 实验首次用单色 LED 光源获得了 Bessel 光束, 并且光束最大无衍射距离和中心光斑直径均与理论吻合. 最后考查了不同光阑孔径对所得 Bessel 光束质量的影响, 对比得到: 随着光阑孔径增大所得 Bessel 光束光强提高但截面光强图亮暗对比度下降, 当光阑孔径增大到一定程度时将不能再形成 Bessel 光束. 在实际应用中具有重要的指导意义.

参考文献

- 1 Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. *J Opt Soc Am A*, 1987, 4(4): 651–654
- 2 Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T, et al. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 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. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(10): 1131–1137]
- 3 Ma B T, Wu F T, Ma L. Nanosecond non-diffraction Bessel green beam generated directly from an unstable resonator by active method. *Acta Phys Sin*, 2010, 59(9): 6213–6218 [马宝田, 吴逢铁, 马亮. 非稳腔主动式直接获取纳秒近似无衍射贝塞尔绿光. *物理学报*, 2010, 59(9): 6213–6218]
- 4 Grier D G. A revolution in optical manipulation. *Nature*, 2003, 424: 810–816
- 5 Summers M D, Reid J P, McGloin D. Optical guiding of aerosol droplets. *Opt Exp*, 2006, 14(14): 6373–6380
- 6 McCan L I, Dykman M, Golding B. Thermally activated transitions in a bistable three-dimensional optical trap. *Nature*, 1999, 402: 785–787
- 7 Gustavson T L, Chikkatur A P, Leanhardt A E, et al. Transport of Bose-Einstein Condensates with Optical Tweezers. *Phys Rev Lett*, 2001, 88: 020401
- 8 Chen J, Ng J, Lin Z F, et al. Optical pulling force. *Nat Photonics*, 2011, 5: 531–534
- 9 Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(15): 1499–1501

- 10 Turunen J, Vasara A, Friberg A T. Holographic generation of diffraction-free beams. *Appl Opt*, 1988, 27(19): 3959–3962
- 11 Vasara A, Turunen J, Friberg A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(11): 1748–1757
- 12 Gutiérrez-Vega C J, Rodríguez-Masegosa R, Chávez-Cerda S. Bessel±Gauss resonator with spherical output mirror: Geometrical- and wave-optics analysis. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(11): 2113–2122
- 13 Wu F T, Jiang X G, Liu B, et al. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon. *Acta Phys Sin*, 2009, 58(5): 3125–3129 [吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析. *物理学报*, 2009, 58(5): 3125–3129]
- 14 Basano L, Ottonello P. Demonstration experiments on non-diffracting beams generated by thermal light. *Am Assoc Phys Teach*, 2005, 73(9): 826–830
- 15 Zhu X, Lzgen A S, Wei H, et al. White light Bessel-like beams generated by miniature all-fiber device. *Opt Exp*, 2011, 19(12): 11365–11374
- 16 Leach J, Gibson G M, Padgett M J, et al. Generation of achromatic Bessel beams using a compensated spatial light modulator. *Opt Exp*, 2006, 14(12): 5581–5587
- 17 Lo'pez-Mariscal C, Gutiérrez-Vega J C. Observation of optical guiding using thermal light. *J Opt*, 2010, 12: 075702
- 18 Ding Z H, Ren H W, Zhao Y H, et al. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens. *Opt Lett*, 2001, 27(4): 243–245
- 19 Fischer P, Brown C T A, Morris J E, et al. White light propagation invariant beams. *Opt Exp*, 2005, 13(17): 6657–6666
- 20 Zhao K H, Zhong X H. *Optics (Vol.1)*. Beijing: Peking University Press, 2008. 323–327, 278–281 [赵凯华, 钟锡华. *光学(上卷)*. 北京: 北京大学出版社, 2008. 323–327, 278–281]
- 21 Friberg A T. Stationary-phase analysis of generalized axicons. *Opt Soc Am A*, 1996, 13(4): 743–750

Non-diffraction bessel-like beam generated by green LED source

CHENG ZhiMing, WU FengTie*, FAN DanDan & FANG Xiang

College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China

Ideal Bessel-like beam was generated by monochromatic LED source for the first time. In this paper, the possibility of using monochromatic LED source to generate quite ideal Bessel-like beam was discussed from the angle of spatial and temporal coherence, then we knew it's possible if a diaphragm was involved to increase spatial coherence. Optical system was designed: light wave emitted from LED passed axicon after the optical system, and then Bessel-like beam was obtained, the size of center bright spots and non-diffraction distance was accord well with the results which obtained from theoretical calculations, it demonstrated LED source could used to generate quite ideal Bessel-like beam. At last we discussed how the diaphragm's diameter affected the quality of Bessel beam, and found that the light intensity increased but contrast ratio of section intensity declined as the diaphragm's diameter enlarged.

Bessel beam, LED source, axicon

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Hz, 42.15.Eq, 42.25.-p

doi: 10.1360/132011-1257