

## 非相干光源无衍射光的自重建\*

范丹丹<sup>1)</sup> 吴逢铁<sup>1)†</sup> 程治明<sup>1)</sup> 朱健强<sup>2)‡</sup>

1) (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, 厦门 361021)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(2012年11月4日收到; 2012年12月3日收到修改稿)

基于 Hankel 波理论分析了非相干光源产生 Bessel 光束的自重建特性, 利用光学设计软件 ZEMAX 模拟了 Bessel 光束经过轴上圆形障碍物后的截面光强分布. 由于发光二极管 (LED) 具有一定的频谱宽度且不像激光具有很高的相干度, 因此我们采用一定频宽范围的连续谱来描述. 从模拟结果可以直观地看出 Bessel 光束被轴上圆形障碍物遮挡后逐步完成自重建, 说明用 LED 非相干光作为光源具有自重建特性. 实验上采用 LED 和轴棱锥元件产生 Bessel 光束, 然后通过轴上圆形障碍物、轴上方形障碍物, 并拍摄了不同位置处的截面光强分布图, 证实了非相干光源产生 Bessel 光束的自重建特性. 实验结果和模拟结果相符合.

关键词: 无衍射光束, LED 光源, 轴棱锥, 自重建

PACS: 42.15.-i, 42.15.Eq, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.62.104219

## 1 引言

无衍射光束是由 Durnin 等<sup>[1]</sup>于 1987 年首次提出, 它是自由空间标量波动方程的一组特殊解, 其场分布具有第一类零阶 Bessel 函数的形式. 它以其独特的性质 (传输中保持光强分布不变, 中心光斑小) 引起人们的广泛关注, 可应用在光学囚禁与微操作<sup>[2]</sup>、非线性光学<sup>[3]</sup>、光学相干断层扫描<sup>[4]</sup>、干涉测量<sup>[5]</sup>、光学拉力<sup>[6]</sup>等方面.

随着科学研究的深入, 研究人员发现 Bessel 光束具有高斯光束等普通光束不曾有的重要性质——自重建特性<sup>[7,8]</sup>, 这对于粒子多层面捕获具有特殊意义. 关于 Bessel 光束的自重建特性, 国内外学者研究的主要是相干光源, 我们研究小组也做了相关的理论和实验研究<sup>[9-11]</sup>, 对于非相干光源 Bessel 光束自重建特性的系统研究国内外尚未见报道, 而发光二极管 (LED) 具有一定的频谱宽度, 并且不像激光一样具有很高的相干度, 可以视为非相干光源. 作为一种新型固态光源, LED 由于其节能环保、长

寿命等众多优点以及在光纤通讯等众多领域的广泛应用, 越来越受到研究者的重视<sup>[12,13]</sup>. 最近我们首次利用非相干单色 LED 光源获得了近似无衍射 Bessel 光束<sup>[14]</sup>, 产生的 Bessel 光束同样可以用于粒子囚禁、微粒操控<sup>[15]</sup>. 本文基于 Hankel 波理论, 详细分析了 Bessel 光束的形成原理, 解释了非相干光源产生 Bessel 光束并经过障碍物发生重建的过程, 并用 ZEMAX 光学设计软件对 Bessel 光束经过轴上圆形障碍物的截面光强分布进行了模拟, 模拟仿真与实验结果符合得很好. 研究结果让人们对于无衍射光束的自再现特性有了一个更直观的认识, 对实际应用具有更好的指导意义.

## 2 理论分析

光波在自由空间传播时, 电场分量  $E$  满足 Helmholtz:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0, \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61178015)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金 (批准号: SG001102)、福建省自然科学基金项目 (批准号: 2012J01278) 和泉州市科技重点项目 (批准号: 2011G9) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

在柱坐标系下特征函数  $E = H(\rho)\exp(-ik_z z + im\phi)$ , 代入 (1) 式得

$$\rho^2 \frac{d^2 H}{d\rho^2} + \rho \frac{dH}{d\rho} + [(k^2 - k_z^2)\rho^2 - m^2] H = 0, \quad (2)$$

其中  $\rho$  为径向坐标,  $\phi$  为方向角,  $k$  为波数,  $k_z$  为波矢的径向分量. 方程 (2) 为  $m$  阶 Bessel 方程, 则它的一组线性无关解为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} & H_m^{(1)}(k\rho)\exp(-ikz + im\phi) \\ &= [J_m(k\rho) + iN_m(k\rho)]\exp(-ikz + im\phi), \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & H_m^{(2)}(k\rho)\exp(-ikz + im\phi) \\ &= [J_m(k\rho) - iN_m(k\rho)]\exp(-ikz + im\phi), \quad (4) \end{aligned}$$

其中,  $H_m^{(1)}$ ,  $H_m^{(2)}$  分别表示第一类和第二类 Hankel 函数,  $k\rho$  为波矢的径向分量,  $J_m$  为  $m$  阶 Bessel 函数,  $N_m$  为  $m$  阶 Neumann 函数. 将 (3) 和 (4) 式相加可得

$$\begin{aligned} & [H_m^{(1)}(k\rho) + H_m^{(2)}(k\rho)]\exp(-ikz + im\phi) \\ &= 2J_m(k\rho)\exp(-ikz + im\phi), \quad (5) \end{aligned}$$

当  $m = 0$  时, (5) 式整理为

$$\begin{aligned} & [H_0^{(1)}(k\rho) + H_0^{(2)}(k\rho)]\exp(-ikz) \\ &= 2J_0(k\rho)\exp(-ikz), \quad (6) \end{aligned}$$

(6) 式表示的是第一类零阶 Hankel 波  $H_0^{(1)}$  和第二类零阶 Hankel 波  $H_0^{(2)}$  相叠加产生 Bessel 光的表达式. 图 1 中 ICWs (incoming conical waves) 代表入射锥面波, OCWs (outgoing conical waves) 代表出射锥面波. 由于 LED 光源是多波长光场, (6) 式改写为

$$\begin{aligned} & \sum [H_0^{(1)}(k\rho) + H_0^{(2)}(k\rho)]\exp(-ikz) \\ &= \sum 2J_0(k\rho)\exp(-ikz). \quad (7) \end{aligned}$$

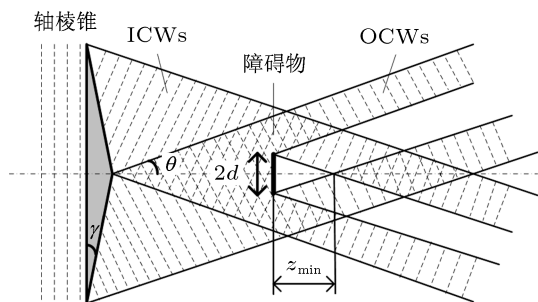


图 1 用 Hankel 波描述 Bessel 光形成及自重建示意图

在光束的传播轴上放置一个不透明的障碍物, 光束不会因此而停止传播, 反而绕过障碍物继续传

播, 并在障碍物后方投下一片阴影区, 在该阴影区内 Bessel 光束很快会恢复到原来的光强分布, 在最大无衍射距离内能够重建. 若障碍物的直径为  $2d$ , 则最小自重建距离通过几何关系可表示为

$$Z_{\min} = \frac{d}{2(n-1)\gamma}. \quad (8)$$

### 3 模拟仿真

利用光学设计 ZEMAX 软件对非相干 LED 光源经轴棱锥产生 Bessel 光束后经过轴上障碍物的过程直接进行建模. 在这里, 轴棱锥模型可以直接建模, 也可以通过三维制图软件建模后导入到 ZEMAX. 在 ZEMAX 里要建立像轴棱锥锥面效果的表面, 曲率半径必须设置很小的值, 而二次曲率常数必须小于  $-0.1$ . 对于底角 (轴棱锥底面与锥面间的夹角) 为  $\gamma$  的轴棱锥锥面的二次曲率常数可以根据 (9) 式计算

$$C = -\left(\frac{1}{\tan^2 \gamma} + 1\right). \quad (9)$$

锥面的曲率半径的精确值设置没有太高要求, 但必须使它的值远小于入射光束半径的值. 这里, 入射光束半径  $d = 1.8 \text{ mm}$ , 底角  $\gamma = 1^\circ$ , 根据 (9) 式可计算出二次曲率常数  $C = -3283$ , 锥面的曲率半径为  $-0.05$ , 材料选择 BK7 玻璃, 轴棱锥厚度为  $2 \text{ mm}$ , 障碍物以吸收面代替, 光源采用非相干 LED 光源, 由于 LED 产生的光场是多波长的光场, 应当用一定谱宽范围的连续谱来描述. 图 2 为用积分球测得的实验所用一颗功率为  $3 \text{ W}$  的蓝光频谱图, 测得主波长  $\lambda = 460 \text{ nm}$ , 频谱半峰宽度  $\Delta\lambda \approx 23 \text{ nm}$ . 对图 2 中频谱进行分析, 将非单色光分解成不同频率的单色光的组合, 取波长间隔  $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ , 得到各波长对应的相对光强如表 1 所示.

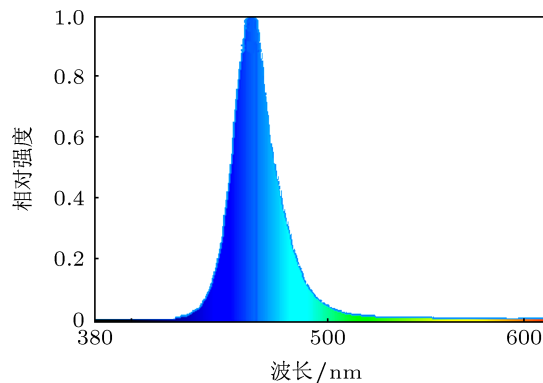


图 2 蓝光 LED 频谱图

表 1 不同波长对应的相对光强

波长 $\lambda/\text{nm}$	435	440	445	450	455	460	465	470
相对强度	0.044	0.1	0.217	0.460	0.820	1	0.818	0.524
波长 $\lambda/\text{nm}$	475	480	485	490	495	500	505	510
相对强度	0.368	0.238	0.139	0.085	0.055	0.035	0.022	0.015

建立好模型以后, 首先选择在轴棱锥后 80 mm 处的轴上放置直径为  $100\ \mu\text{m}$  的圆形障碍物. 由 (8) 式计算得障碍物后最小重建距离为 6.255 mm. 以障碍物处为  $z$  轴起点, 图 3 为圆形障碍物前后不同位置处的截面光强分布模拟图.

从图 3 可以看出, 在未放入圆形障碍物时, 在  $z = 80\ \text{mm}$  处为完整的 Bessel 光分布, 当放上障碍物后 Bessel 光被部分遮挡, 随着传输距离的增大, 光束继续传播至  $z = 100.5\ \text{mm}$  处 Bessel 光恢复原状, 发生完整自重建现象. 为了验证 Bessel 光束对其他形状障碍物的自重建特性, 选择在轴上放置大小为  $100\ \mu\text{m}$  的方形障碍物, 图 4 为轴

上方形障碍物前后不同位置处的截面光强分布模拟图.

以上实现了 LED 非相干光产生 Bessel 光束通过障碍物后的一次重建, 通过图 3 圆形障碍物的光束仍为 Bessel 光束, 如果在发生重建的 Bessel 光束区域内, 放置一较小的障碍物, 且入射光强足够强的情况下, Bessel 光束还可以发生二次重建. 下面将在图 3 圆形障碍物一次重建的基础上进行二次重建模拟, 在  $z = 110\ \text{mm}$  处再放置一个大小为  $100\ \mu\text{m}$  方形障碍物. 模拟结果如图 5 所示, 在第二个障碍物后一定距离处, Bessel 光束又恢复了原状, 发生二次重建现象.

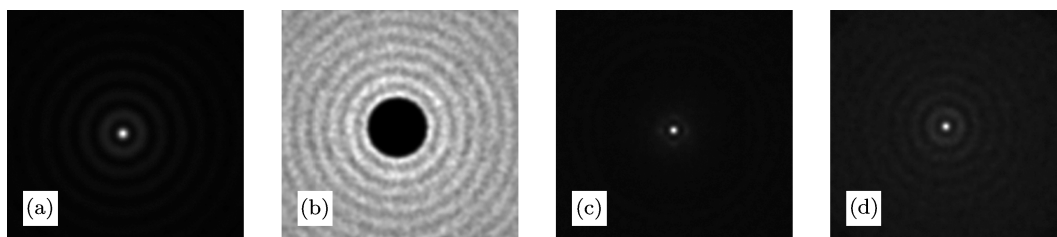


图 3 圆形障碍物前后截面光强分布 (a)  $z = 80\ \text{mm}$ ; (b) 在  $z = 80\ \text{mm}$  处放置圆形障碍物; (c)  $z = 86\ \text{mm}$ ; (d)  $z = 100.5\ \text{mm}$

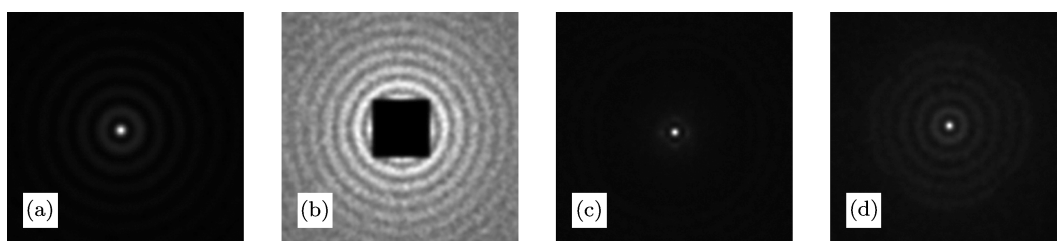


图 4 方形障碍物前后截面光强分布 (a)  $z = 80\ \text{mm}$ ; (b) 在  $z = 80\ \text{mm}$  处放置方形障碍物; (c)  $z = 86\ \text{mm}$ ; (d)  $z = 100.5\ \text{mm}$

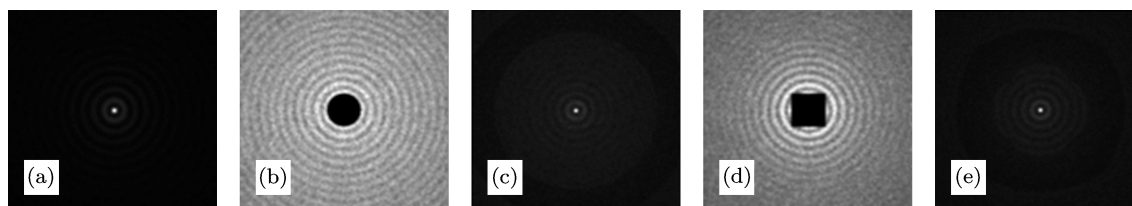


图 5 轴上二次重建不同位置处截面光强分布 (a)  $z = 80\ \text{mm}$ ; (b) 在  $z = 80\ \text{mm}$  处放置圆形障碍物; (c)  $z = 100.5\ \text{mm}$ ; (d)  $z = 110\ \text{mm}$  放置方形障碍物; (e)  $z = 136\ \text{mm}$

### 4 实验验证

利用 LED 和轴棱锥元件产生 Bessel 光束, 再经过轴上圆形障碍物, 实验装置如图 6 所示.

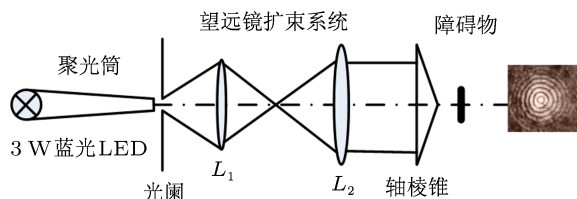


图 6 实验光路图

实验中选择光源为  $\lambda = 462 \text{ nm}$  的 LED 非相干光源, 为提高 LED 光源相干性, 在离光源较远处放一小孔径光阑, 由于 LED 灯珠光强分布并非理想的均匀光, 在灯珠与光阑间加放一个锥形的聚光筒, 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. 图中光阑为直径  $d = 0.2 \text{ mm}$  的光阑, 光源与光阑间距离  $D = 320 \text{ mm}$ ,  $L_1, L_2$  分别是焦距为  $f_1 = 15 \text{ mm}, f_2 = 190 \text{ mm}$  的凸透镜, 在实验光路中作为准直扩束系统, 轴棱锥底角  $\gamma = 1^\circ$ , 障碍物采用印刷的菲林片, 轴上圆形障碍物大小为  $100 \mu\text{m}$ , 以障碍物所在位置为  $z$  轴起点, 利用体视显微镜和 CCD 成像系统拍摄截面光强分布.

图 7 为实验拍摄轴上圆形障碍物前后不同位置处的截面光强图. 从图中可以看出, 在未放入圆

形障碍物时, 在  $z = 80 \text{ mm}$  处为完整的 Bessel 光分布, 当在  $80 \text{ mm}$  处放上圆形障碍物后, 中心光斑被部分遮挡, 随着接受屏的移动即传输距离的增大, 圆形障碍物轮廓变得越来越模糊, Bessel 光束开始重建, 在离障碍物较远时, 中心光斑发生了畸变, 当达到一定距离时, Bessel 光束发生自重建现象.

在轴上放置方形障碍物, 实验结果如图 8 所示. 可见, 非相干光源产生 Bessel 光束经过方形障碍物也具有自重建特性, 自重建后的光束仍为 Bessel 光束. 因此在  $z = 110 \text{ mm}$  处在放置一个大小为  $100 \mu\text{m}$  的方形障碍物, 利用 CCD 成像系统拍摄不同距离处截面光强分布, 可看出第二个障碍物后一定距离处, Bessel 光束又恢复了原状, 发生二次重建 (图 9).

### 5 结论

由几何光学方法对无衍射光经障碍物的重建过程进行分析, 很好地解释了无衍射光束自再现的形成原理. 本文首先从几何光学角度对轴棱锥产生无衍射光束的自再现特性进行了详细的描述, 并对光束传输进行仿真, 最后通过实验验证 LED 光源产生无衍射光束也具有自再现特性. 若在实际应用中利用 LED 非相干光作为光源, 可大幅度降低光源成本, 且极易获得, 能够实现微粒的多层面捕获和囚禁粒子. 实验结果与理论分析相符合.

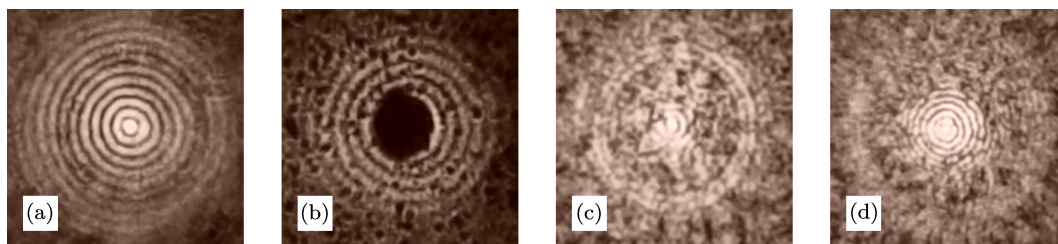


图 7 实验拍摄轴上圆形障碍物不同位置处截面光强 (a)  $z = 80 \text{ mm}$ ; (b) 在  $z = 80 \text{ mm}$  处放上圆形障碍物; (c)  $z = 86 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 100.5 \text{ mm}$

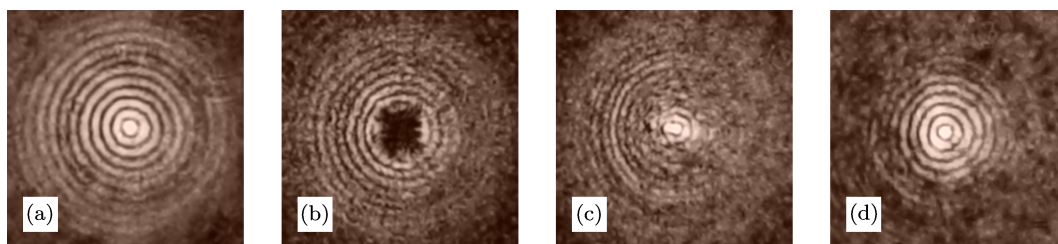


图 8 实验拍摄轴上方形障碍物不同位置处截面光强 (a)  $z = 80 \text{ mm}$ ; (b) 在  $z = 80 \text{ mm}$  处放上方形障碍物; (c)  $z = 86 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 100.5 \text{ mm}$

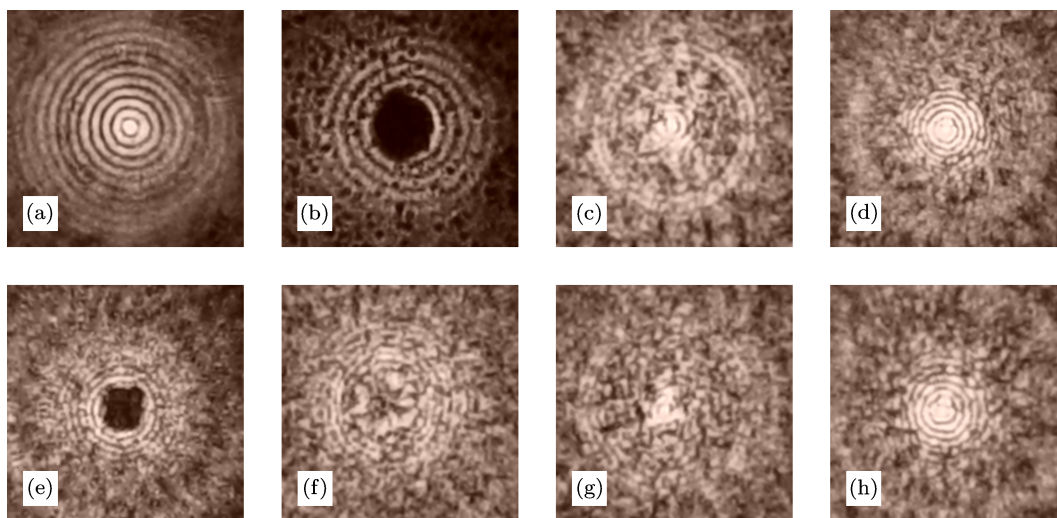


图9 实验拍摄轴上二次重建不同位置处截面光强分布 (a)  $z = 80$  mm; (b) 在  $z = 80$  mm 处放置圆形障碍物; (c)  $z = 86$  mm; (d)  $z = 100.5$  mm; (e) 在  $z = 110$  mm 处放置方形障碍物; (f)  $z = 118$  mm; (g)  $z = 125$  mm; (h)  $z = 136$  mm

- [1] Durnin J 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 651
- [2] Garcés C V, McGloin D, Melville H, Sibbett W, Dholakia K 2002 *Nature* **419** 145
- [3] Wulle T, Herminghaus S 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1401
- [4] Lee K S, Rolland J P 2008 *Opt. Lett.* **33** 1696
- [5] Fortin M, Piche M, Borra E F 2004 *Opt. Express* **12** 5887
- [6] Jun C, Ng J, Zhifang L, Chan C T 2011 *Nat. Photon.* **5** 531
- [7] Bouchal Z, Wagner J, Chlup M 1998 *Opt. Commun.* **151** 207
- [8] Florian O F, Philipp S, Alexander R 2010 *Nat. Photon.* **204** 1
- [9] Liu B, Wu F T, Jiang X G 2008 *Chin. J. Lasers* **36** 379 (in Chinese) [刘彬, 吴逢铁, 江新光 2008 中国激光 **36** 379]
- [10] 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]
- [11] Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T, Pu J X 2011 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **41** 1131 [张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 蒲继雄 2011 中国科学 **41** 1131]
- [12] Andrew M S, Gary A S, Joshua M 2004 *SPIE* **5530** 182
- [13] Zhao M, Xiao S L, Wang X, Shi J, Huang R, Jiang R R 2010 *Laser Optoelectron. Prog.* **47** 040602 (in Chinese) [赵明, 肖沙里, 王玺, 施军, 黄睿, 姜蓉蓉 2010 激光与光电子学进展 **47** 040602]
- [14] Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, Fang X 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 805 [程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 方翔 2012 中国科学 **42** 805]
- [15] Lopez-Mariscal C, Gutierrez-Vega J C 2010 *J. Opt.* **12** 1
- [16] Cház ez-Cerda S, McDonald G S, New G H C 1996 *J. Opt. Commun.* **123** 225

# Reconstruction of incoherent source Bessel beam\*

Fan Dan-Dan<sup>1)</sup> Wu Feng-Tie<sup>1)†</sup> Cheng Zhi-Ming<sup>1)</sup> Zhu Jian-Qiang<sup>2)‡</sup>

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

2) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 4 November 2012; revised manuscript received 3 December 2012)

## Abstract

Based on the Hankel wave theory, reconstruction property of Bessel beam generated by incoherent source is analyzed. The section light intensity distribution of Bessel beam after on-axis circular obstacle is simulated by optical design software ZEMAX. Light emitting diode (LED) has a certain spectrum width, therefore we describe it by using a continuous spectrum with a certain range of spectral width. From the simulation results we can see visually that Bessel beam gradually realizes the reconstruction after circular obstacles on-axial shelter. It is proved that LED has the reconstruction property. We use LED and axicon element to generate Bessel beam. This Bessel beam passes through an on-axis circular obstacle and an on-axis square obstacle. We take the pictures of the section light intensity distribution at different positions. The reconstruction properties of the LED incoherent source are verified. Experimental results accord well with the simulation results.

**Keywords:** Bessel beam, LED source, axicon, reconstruction

**PACS:** 42.15.-i, 42.15.Eq, 42.25.-p

**DOI:** 10.7498/aps.62.104219

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178015), the High Power Laser Physics Key Laboratory Open Foundation of China (Grant No. SG001102), 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).

† Corresponding author. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn