论文

绿光 LED 产生高阶 Bessel 光的自再现

何西, 吴逢铁*, 李攀, 孙川

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

*联系人, E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

收稿日期: 2013-04-23; 接受日期: 2014-06-18

国家自然科学基金(批准号: 61178015)和福建省自然科学基金(编号: 2012J01278)资助项目

摘要 基于 Hankel 波理论分析了非相干光源产生高阶 Bessel 光束的自再现的可能性, 利用交叉谱密度公式模拟了非相干绿光 LED 光源产生的一阶 Bessel 光束经过轴上圆形障碍物后的自再现光场分布, 实验上通过由绿光 LED 发出的光场经过螺旋相位板和轴棱锥后产生一阶 Bessel 光束, 并在光轴上放置圆形障碍物、方形障碍物来验证非相干光源产生的高阶 Bessel 光束的自再现特性, 实验结果和理论模拟基本吻合, 研究结果对于利用非相干光源实现多点光捕获和微粒操控有重要参考价值.

关键词 高阶 Bessel 光束, 绿光 LED, 自再现, 轴棱锥, 螺旋相位板

PACS: 42.15.-i, 42.25.Fx, 42.25.Kb, 42.25.-p

doi: 10.1360/SSPMA2014-00110

高阶 Bessel 光束中心为相位奇点, 光强为零, 因此在粒子捕获^[1]、光镊^[2,3]等粒子微操作方面有重要的应用价值, 并且由于高阶 Bessel 光束还带有螺旋相位因子 $\exp(i l \theta)$, 具有轨道角动量 $l \hbar$ ^[4], 在与物质的相互作用过程中会有角动量的交换从而使物体发生旋转, 可当做光学扳手^[5], 具有轨道角动量的高阶 Bessel 光束还可实现信息编码^[6]; 高阶 Bessel 光束和零阶 Bessel 光束一样具有无衍射光束一种重要的性质即自再现特性^[7-9], Bessel 光束的自再现特性是指 Bessel 光束在遇到障碍物后其光场分布并不会完全消失, 在障碍物后的一段距离内 Bessel 光束又重新出现的特性. 2002 年 Garcés-Chavez 等人^[10]提出利用无衍射光束的自再现特性实现多层面的粒子微操作, 在多层面粒子操控中若利用高阶 Bessel 光束来捕获粒子,

高阶 Bessel 光束的自再现特性使得高阶 Bessel 光束在一个层面对粒子进行捕获后其自重建的光束还能进行下一个层面的粒子捕获, 并且高阶 Bessel 光束属于空心光束的一种^[11], 在构建光镊系统时可以避免传统光镊造成的热损伤问题^[12], 因此高阶 Bessel 光束的自再现特性对于多层面的粒子操控具有重要意义, 此外 Bessel 光束的自再现特性在光学相干断层扫描成像(OCT)中也有着重要的应用^[13,14]. 传统产生高阶 Bessel 光束以相干的激光做为光源, 与相干的激光光源相比, 非相干光源发出的光经过一段距离传输后形成的部分相干光同样具有良好的方向性^[15], 并且部分相干光受散斑的影响比相干光受到的影响要小^[16], LED 作为一种新型成本较低且易获得的非相干光源具有耗电量低、坚固耐用、安全可靠性强、高

引用格式: 何西, 吴逢铁, 李攀, 等. 绿光 LED 产生高阶 Bessel 光的自再现. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 014202

He X, Wu F T, Li P, et al. Self-reconstruction of high-order Bessel beams generated by green LED light source (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 014202, doi: 10.1360/SSPMA2014-00110

亮度低热量、体积小、环保等一些优于激光光源的优点, 研究非相干 LED 光源产生的高阶 Bessel 光束遇到障碍物后的自再现对于高阶 Bessel 光束的传输和多层面粒子的微操控具有重要参考价值. 本课题组在关于相干光源产生零阶、高阶 Bessel 光束的自再现和非相干光源产生零阶 Bessel 光束及其自再现方面做过一些研究^[8,9,17-19], 然而非相干光源产生的高阶 Bessel 光束的自再现目前尚未见报道. 本文基于 Hankel 波理论分析了非相干 LED 光源产生的高阶 Bessel 光束遇到障碍物后能够自再现的可能性, 并利用交叉谱密度理论数值模拟了非相干 LED 光源产生的高阶 Bessel 光束遇到障碍物前后的光场分布, 随后设计实验进行验证, 实验结果表明非相干光源产生的高阶 Bessel 光束遇到障碍物后能够实现自再现, 实验结果与数值模拟基本吻合.

1 理论分析

光波在自由空间中传播时, 光波的电场分量 E 满足亥姆霍兹方程

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

在柱坐标系下将特征函数 E 设为 $E = H(\rho)\exp(-ik_z z + in\phi)$, 代入(1)式可得

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

其中 ρ 为径向坐标, ϕ 为方位角, k 为波数, k_z 为轴向波矢分量, (2)式为 n 阶 Bessel 方程, 它的一组线性无关的解是

$$\begin{aligned} & H_n^{(1)}(k_\rho \rho) \exp(-ikz + in\phi) \\ & = [J_n(k_\rho \rho) + iN_n(k_\rho \rho)] \exp(-ikz + in\phi), \end{aligned} \quad (3)$$

$$H_n^{(2)}(k_\rho \rho) \exp(-ikz + in\phi)$$

$$= [J_n(k_\rho \rho) - iN_n(k_\rho \rho)] \exp(-ikz + in\phi), \quad (4)$$

式中 k_ρ 为径向波矢分量, $H_n^{(1)}$, $H_n^{(2)}$ 分别是第一类和第二类 n 阶汉克尔函数(Hankel function), J_n 是 n 阶 Bessel 函数, N_n 是 n 阶诺伊曼函数(Neumann function).

将(3), (4)两式相加可得

$$\begin{aligned} & [H_n^{(1)}(k_\rho \rho) + H_n^{(2)}(k_\rho \rho)] \exp(-ikz + in\phi) \\ & = 2J_n(k_\rho \rho) \exp(-ikz + in\phi). \end{aligned} \quad (5)$$

当 $n \neq 0$ 时, (5)式即表示第一类 n 阶汉克波 $H_n^{(1)}$ 与第二类 n 阶汉克波 $H_n^{(2)}$ 叠加产生高阶 Bessel 光的表达式, 由于第一类 n 阶汉克波 $H_n^{(1)}$ 与第二类 n 阶汉克波 $H_n^{(2)}$ 都带有螺旋相位因子 $\exp(in\phi)$, 因此相叠加产生的高阶 Bessel 光束也具有螺旋相位因子 $\exp(in\phi)$, 第一类 n 阶汉克波 $H_n^{(1)}$ 描述的是轴对称的从轴线向外的出射锥面波(Outgoing Conical Wave-OCW), 第二类 n 阶汉克波 $H_n^{(2)}$ 描述的是轴对称的从外向轴线的入射锥面波(Incoming Conical Wave-ICW).

非相干绿光 LED 光源发出的光经过螺旋相位板和轴棱锥后再经过障碍物自再现的几何光路示意图, 如图 1 所示.

图 1 中轴棱锥的底角为 γ , 因为光源是非相干宽频谱的绿光 LED, 其光谱由多波长组成, 绿光 LED 发出的平面光波经过螺旋相位板和轴棱锥后形成向光轴会聚的多波长叠加的入射锥面波(ICWs)和从光轴出发的多波长叠加的出射锥面波(OCWs), 当两束锥面波遇到直径为 $2d$ 的轴上障碍物 CD 后出射锥面波中间部分被障碍物阻挡, 外围没有被阻挡的部分向偏离光轴的方向继续传播, 入射锥面波中间部分也被阻挡, 外围没有被阻挡的部分向光轴方向继续传播, 并在离障碍物一段距离后两束没有被阻挡的

图 1 绿光 LED 产生高阶 Bessel 光束自再现几何光路图

Figure 1 Self-reconstruction geometrical optical path of high-order Bessel beams generated by green LED.

波面在 EFGH 区域相叠加重新形成高阶 Bessel 光束, 即完成了高阶 Bessel 光束的自再现.

若照射在轴棱锥上的光束半径为 R , 轴棱锥的折射率为 n , 光束经过轴棱锥后偏转角为 θ , 当轴棱锥底角很小时, 根据几何关系有

$$\theta \approx \tan \theta \approx (n-1)\gamma. \quad (6)$$

因此障碍物后高阶 Bessel 光束最小自再现的距离为

$$Z_{\min} = d/\tan \theta \approx d/(n-1)\gamma. \quad (7)$$

由图 1 可知若轴棱锥后高阶 Bessel 光束的最大无衍射距离为 $Z_{\max}=R/(n-1)\gamma$ ^[20], 则障碍物后自再现的高阶 Bessel 光束的最大无衍射距离为 $Z_{\max}-Z_{\min}-h$, 带入(7)式可得

$$Z_{\max} - Z_{\min} - h = [1/(n-1)\gamma](R-d) - h. \quad (8)$$

由上式可知: 当轴棱锥的折射率和底角不变时, 障碍物的尺寸越大, 高阶 Bessel 光束自再现的长度越小, 当障碍物尺寸不变时, 轴棱锥的底角越大, 高阶 Bessel 光束自再现的长度也越小.

2 数值模拟

实验所用绿光 LED 的光谱由杭州远方公司的 PMS-80 光束分析系统和直径 20 cm 的积分球测定, 光谱分布如图 2 灰色区域所示, 其主波长为 531 nm, 图 2 中虚线所示为中心波长为 531 nm, 半峰宽度为 36 nm 的高斯型光谱分布, 由图 2 可以看出绿光 LED 的光谱分布与高斯型光谱分布相近, 且由参考文献[21]可知单色 LED 光源的相干度也是按高斯型分布的, 因此可以用高斯-谢尔模型近似代替绿光 LED 发出的光场.

高斯-谢尔模型的交叉谱密度可以表示为

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\rho}_1^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2}{2\delta^2}\right). \quad (9)$$

图 2 绿光 LED 光谱特性图
Figure 2 Spectrum of green LED.

式中, ω 是光束的束腰宽度, δ 是光束的空间相干长度.

螺旋相位板的透过率函数为 $t_1(\theta) = \exp(il\theta)$, 其中 l 为螺旋相位板的阶数, θ 为螺旋相位板的方位角. 轴棱锥的透过率函数为 $t_2(\rho) = \exp[ik\phi(\rho)]$, ($\rho \leq R$), 其中 $\phi(\rho) = -(n-1)\gamma\rho$, n 是轴棱锥的折射率, γ 是轴棱锥的底角, R 是照射在轴棱锥上的光束半径, k 是波矢, $k=2\pi/\lambda$. 由于绿光 LED 的光谱是宽频光谱由多波长组成, 此时轴棱锥的折射率不再是一个常数, 根据文献[19] Sellmeier 色散公式为

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}. \quad (10)$$

实验所用轴棱锥材料的为 Fused Silica, 公式(10)中相应的材料系数为

$$\begin{cases} B_1 = 0.6961633, & C_1 = 4.67914826 \times 10^{-3}, \\ B_2 = 0.4079426, & C_2 = 1.3512063 \times 10^{-2}, \\ B_3 = 0.8974900, & C_3 = 9.7934002 \times 10^1, \end{cases} \quad (11)$$

此时轴棱锥的透过率函数即为

$$t(\rho) = \exp\{-ik[n(\lambda)-1]\gamma\rho\}, (\rho \leq R). \quad (12)$$

由交叉谱密度传输公式, 单一波长的部分相干光经过螺旋相位板和轴棱锥后在距离轴棱锥 Z 处的交叉谱密度为

$$\begin{aligned} W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \varphi_1, \varphi_2, z) &= \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^2 \iiint \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\rho}^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2}{\omega^2}\right) \\ &\times \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2}{2\delta^2}\right) \exp[-il(\theta_1 - \theta_2)] \\ &\times \exp[-ik(\phi(\rho_1) - \phi(\rho_2))] \\ &\times \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z}\{[\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r}_1]^2 - [\boldsymbol{\rho}_2 - \mathbf{r}_2]^2\}\right\} d^2\rho_1 d^2\rho_2. \end{aligned} \quad (13)$$

对(13)式进行化简, 并当 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}$, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ 时 $W(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \varphi, \varphi, z)$ 为轴棱锥后 Z 处的光强

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, \varphi, z) &= W(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \varphi, \varphi, z) = \left(\frac{2\pi}{\lambda z}\right)^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \iint_R \\ &\times \exp\left[-\left(\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{2\delta^2}\right)(\rho_1^2 + \rho_2^2)\right] \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z}(\rho_1^2 - \rho_2^2)\right\} \\ &\times \exp\{ik(n(\lambda)-1)\gamma(\rho_1 - \rho_2)\} J_m\left(\frac{2\pi\rho_1 r}{\lambda z}\right) \\ &\times J_m\left(\frac{2\pi\rho_2 r}{\lambda z}\right) I_{l+m}\left(\frac{\rho_1 \rho_2}{\delta^2}\right) \rho_1 \rho_2 d\rho_1 d\rho_2. \end{aligned} \quad (14)$$

由于绿光光谱是宽频光谱, 由多波长组成, 为了更精确地反映 LED 绿光光源的强度分布, 把绿光光谱以中心波长 531 nm 为中心按每隔 5 nm 取其相对光强, 计算光谱中每个部分相干的波长对应轴棱锥后的光强, 乘以其在光谱中的相对光强并叠加就得到整个绿光 LED 发出的光场经过螺旋相位板和轴棱锥后的光强表达式

$$I_{\text{总}} = \sum_{l=0}^{20} C_l I(r, z, \lambda_l). \quad (15)$$

式中 C_l 即为每个波长对应的相对光强, 由光束分析系统自带测量软件测量绿光光谱中各波长对应的相对光强如表 1 所示.

假设障碍物距离轴棱锥顶点的距离为 h , 轴棱锥的折射率为 n , 照射在轴棱锥上的光束半径为 R , 则由图 1 的几何关系可知障碍物后(14)式的积分范围为 $(d, R-h(n-1)\gamma)$, 因此障碍物后的光强表达式为

$$\begin{aligned} I(r, z, \lambda) &= W(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \varphi, \varphi, z) \\ &= (2\pi/\lambda z)^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_d^{R-h(n-1)\gamma} \int_d^{R-h(n-1)\gamma} \\ &\quad \times \exp\left[-\left(\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{2\delta^2}\right)(\rho_1^2 + \rho_2^2)\right] \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z}(\rho_1^2 - \rho_2^2)\right\} \\ &\quad \times \exp\{ik(n(\lambda)-1)\gamma(\rho_1 - \rho_2)\} \\ &\quad \times J_m\left(\frac{2\pi\rho_1 r}{\lambda z}\right) J_m\left(\frac{2\pi\rho_2 r}{\lambda z}\right) I_{l+m}\left(\frac{\rho_1 \rho_2}{\delta^2}\right) \rho_1 \rho_2 d\rho_1 d\rho_2. \end{aligned} \quad (16)$$

由范西特-泽尼克定理^[22]可知光从一个扩展的单色非相干光源发出经过一段传输距离 L 后的空间相干长度为

$$\delta = \frac{1.22L\lambda}{\rho}. \quad (17)$$

式中 ρ 为光源线度, 为了提高绿光 LED 光源发出光的空间相干性, 我们在 LED 灯珠后放置一个光阑, ρ 即为光阑孔径, 取为 0.2 mm, L 为光阑到轴棱锥的距离, 实验中 $L=455$ mm, λ 取绿光 LED 光源的主波长 531 nm, 由(16)式计算得出从光阑开始到轴棱锥处的空间相干长度为: $\delta=1.4738$ mm.

选取其他参数 $R=2.2$ mm, $h=75$ mm, $\gamma=1^\circ$, $d=0.1$ mm, $\omega=2$ mm, $l=1$ mm 由(14)–(16)式进行数值模拟, 模拟所得非相干光源产生高阶 Bessel 光束遇到轴上障碍物后沿轴向自再现光场的截面和径向光强分布如图 3 所示.

图 3 中(a)为没有放置障碍物时 $z=75$ mm 处的光场分布, 图 3(b)–(d)为在 $z=75$ mm 处放置直径为 0.2 mm 的圆形障碍物后的光场分布, 由图 3 可以看出在没有放置障碍物时在 $z=75$ mm 处为完整的一阶 Bessel 光场分布, 当遇到轴上障碍物后一阶 Bessel 光束的光场分布被障碍物遮挡暂时消失, 但随着传播距离的增加, 障碍物的轮廓逐渐消失, 一阶 Bessel 光束的光场

图 3 (网络版彩图)模拟所得绿光 LED 产生一阶 Bessel 光束遇到轴上障碍物后自再现光场分布图

(a) $z=75$ mm; (b) 在 $z=75$ mm 处放置障碍物; (c) $z=87.5$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm

Figure 3 (Color online) Self-reconstruction intensity distribution of first-order Bessel beams generated by green LED with on-axis obstacle in simulation. (a) $z=75$ mm; (b) $z=75$ mm with on-axis obstacle; (c) $z=87.5$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm.

表 1 绿光 LED 光谱中各个波长对应的相对光强

Table 1 Relative intensity matched with different wavelengths

波长 λ (nm)	相对强度	波长 λ (nm)	相对强度
486	0.045	536	0.702
491	0.084	541	0.558
496	0.153	546	0.431
501	0.270	551	0.316
506	0.444	556	0.237
511	0.666	561	0.175
516	0.876	566	0.130
521	0.994	571	0.095
526	0.978	576	0.07
531	0.859	581	0.051

开始重新出现, 带入相关参数由公式(7)计算得出障碍物后最小自再现距离约为: $z_{\min}=12.5$ mm, 由图 3(c)可知在 $z=87.5$ mm 处高阶 Bessel 光束开始自再现, 在 $z=100$ mm 处时, 中心暗环基本出现, 在 $z=120$ mm 处时, 一阶

Bessel 光束的光场基本完成重建.

改变障碍物与轴棱锥的距离 h , 模拟所得障碍物与轴棱锥的距离分别为 60 和 95 mm 时自再现光场径向光场分布图如图 4 所示.

3 实验验证

利用 3 W 绿光 LED 发出的光经过螺旋相位板和轴棱锥后形成高阶 Bessel 光束, 再经过轴上障碍物发生自再现, 实验装置如图 5 所示.

为了使绿光 LED 发出光的光强分布更均匀集中, 在绿光 LED 灯珠的前面放置一个锥形聚光筒, 同时为了提高绿光 LED 的空间相干性, 在聚光筒后一段距离处放置一个光阑, 焦距分别为 $f_1=15$ mm, $f_2=190$ mm 的透镜 L_1, L_2 组成准直扩束系统, 绿光 LED 发出

图 4 (网络版彩图)改变轴棱锥与障碍物距离后模拟所得障碍物后不同距离处一阶 Bessel 光束自再现径向光强

(a) $z=60$ mm; (b) 在 $z=60$ mm 处放置障碍物; (c) $z=72.5$ mm; (d) $z=85$ mm; (e) $z=105$ mm; (f) $z=95$ mm; (g) 在 $z=95$ mm 处放置障碍物; (h) $z=107.5$ mm; (i) $z=120$ mm; (j) $z=140$ mm

Figure 4 (Color online) The radial intensity distribution of self-reconstructing first-order Bessel beams behind the obstacle at different distance in simulation when change the distance between the axicon and the obstacle. (a) $z=60$ mm; (b) $z=60$ mm with on-axis circular obstacle; (c) $z=72.5$ mm; (d) $z=85$ mm; (e) $z=105$ mm; (f) $z=95$ mm; (g) $z=95$ mm with on-axis circular obstacle; (h) $z=107.5$ mm; (i) $z=120$ mm; (j) $z=140$ mm.

图 5 (网络版彩图)绿光 LED 产生高阶 Bessel 自再现的实验装置图

Figure 5 (Color online) Experimental setup of high-order Bessel beams' self-reconstruction generated by green LED.

的光经过准直扩束系统后成为平面波, 再经过螺旋相位板和轴棱锥形成高阶 Bessel 光束, 在轴上分别放置圆形和方形障碍物, 通过 SMZ-168 型体视显微镜观察高阶 Bessel 光束经过轴上障碍物后的自再现特性.

实验中选用螺旋相位板的阶数为 1, 轴棱锥的底角为 1° , 光阑的孔径为 0.2 mm, 在距离轴棱锥 75 mm 处放置一直径为 0.2 mm 的圆形障碍物, 利用体视显微镜拍摄距离轴棱锥顶点不同距离处的截面光强分布, 如图 6 所示. 图 7 为相同实验参数条件下波长为 632.8 nm 的完全相干 He-Ne 激光器产生一阶 Bessel 光束进行的自再现过程.

图 6 (网络版彩图) 实验拍摄轴上圆形障碍物不同距离处截面光强和径向光强

(a) $z=75$ mm; (b) 在 $z=75$ mm 处放置圆形障碍物; (c) $z=87.5$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm; (f) $z=150$ mm; (g) $z=190$ mm

Figure 6 (Color online) Cross section intensity and radial distributions in experiment at different distances with on-axis circular obstacle. (a) $z=75$ mm; (b) $z=75$ mm with on-axis circular obstacle; (c) $z=87.5$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm; (f) $z=150$ mm; (g) $z=190$ mm.

由图 6 可知当没有在轴上放置圆形障碍物时, 光束在 $z=75$ mm 处的光强分布为完整的一阶 Bessel 光分布形式, 当在轴上 $z=75$ mm 处放置一直径为 0.2 mm 的圆形障碍物后, 一阶 Bessel 光束中心部分几乎被完全遮挡, 随着光束传输距离的增加圆形障碍物的轮廓开始变得逐渐模糊, 在 $z=87.5$ mm 处一阶 Bessel 光束开始自再现, 在 $z=100$ mm 处时障碍物的轮廓已完全消失, 一阶 Bessel 光分布又重新出现, 即实现了非相干光源产生高阶 Bessel 光束的自再现, 由图 1 几何光路示意图可知自重建的高阶 Bessel 光束分

图 7 (网络版彩图) 实验拍摄完全相干一阶 Bessel 光自再现的不同距离处的截面光强及径向光强

(a) $z=75$ mm; (b) 在 $z=75$ mm 处放置圆形障碍物; (c) $z=85$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm; (f) $z=190$ mm; (g) $z=270$ mm

Figure 7 (Color online) The self-reconstructing cross section and radial intensity distributions of coherent first-order Bessel beams in experiment at different distances. (a) $z=75$ mm; (b) $z=75$ mm with on-axis circular obstacle; (c) $z=85$ mm; (d) $z=100$ mm; (e) $z=120$ mm; (f) $z=190$ mm; (g) $z=270$ mm.

布于 EFGH 菱形区域内, 所以随着传播距离的增加, 自再现的一阶 Bessel 光束的外环数先逐渐增加, 在到达自再现一阶 Bessel 光束最大无衍射距离的一半时光束外环数达到最大, 随后随着传播距离的增加光束的外环数逐渐减少, 由图 5 也可看出自再现的一阶 Bessel 光束外环数先逐渐增加后逐渐减少, 在 $z=190$ mm 处时一阶 Bessel 光束的特征基本消失. 实验结果与图 3 的理论模拟对比可知, 在障碍物遮挡 Bessel 光束部分(图 3(b), 图 6(b))模拟与实验稍有差距外, 理论模拟与实验结果基本吻合, 由于背景光的影响实验所提取出的径向中心光强比理论模拟稍高.

由色散公式(10)可知, 对于 632.8 nm 的激光轴棱锥的折射率为 1.457, 对于主波长为 531 nm 的 LED 轴棱锥的折射率为 1.461, 因此这两种光束经过轴棱锥后的偏转角相差很小, 近似相等. 与图 7 完全相干的情况相比较, 可以看出 LED 产生的一阶 Bessel 光束由于相干性较差, 其光束的外环数较少^[23]; LED 产

生的一阶 Bessel 光束在 $z=75$ mm 处遇到障碍物后在 $z=87.5$ mm 处开始自再现, 自再现的一阶 Bessel 光束传播到 $z=190$ mm 处基本失去一阶 Bessel 光束的基本特征; 相干激光产生的一阶 Bessel 光束在 $z=75$ mm 处遇到障碍物后在 $z=85$ mm 处开始自再现, 自再现的 Bessel 光束在 $z=190$ mm 处仍具有一阶 Bessel 光束的特征, 在 $z=270$ mm 处一阶 Bessel 光束的基本特征才基本消失, 即 LED 产生的一阶 Bessel 光束与完全相干的一阶 Bessel 光束最小自再现距离基本相同, 但是由于 LED 的相干性较差, 其产生的一阶 Bessel 光束的最大无衍射距离比相干情况下要小^[24], 因此自再现一阶 Bessel 光束的传输距离也比完全相干情况下要小.

改变障碍物与轴棱锥的距离分别为 60 和 95 mm 所得截面和径向光强分布如图 8 所示.

由图 8 可以看出当障碍物与轴棱锥的距离不同时, 障碍物后一阶 Bessel 光束的自再现过程基本相

图 8 (网络版彩图)改变障碍物与轴棱锥的距离后障碍物后一阶 Bessel 光束自再现截面光强和径向光强

(a) $z=60$ mm; (b) 在 $z=60$ mm 处放置圆形障碍物; (c) $z=72.5$ mm; (d) $z=85$ mm; (e) $z=105$ mm; (f) $z=95$ mm; (g) 在 $z=95$ mm 处放置圆形障碍物; (h) $z=107.5$ mm; (i) $z=120$ mm; (j) $z=140$ mm

Figure 8 (Color online) The self-reconstructing cross section and radial intensity distributions of first-order Bessel beams behind the obstacle when change the distance between the axicon and the obstacle. (a) $z=60$ mm; (b) $z=60$ mm with on-axis circular obstacle; (c) $z=72.5$ mm; (d) $z=85$ mm; (e) $z=105$ mm; (f) $z=95$ mm; (g) $z=95$ mm with on-axis circular obstacle; (h) $z=107.5$ mm; (i) $z=120$ mm; (j) $z=140$ mm.

类似, 随着障碍物与轴棱锥距离的增加, 障碍物后相同距离处自再现的一阶 Bessel 光束的中心光强逐渐增加, 光斑中心梯度逐渐降低, 对比度逐渐降低(这一点在理论模拟方面表现的不是很明显), 自再现一阶 Bessel 光束的传播距离逐渐缩短; 理论模拟与实验所得基本吻合, 因为背景光的影响使实验所得径向中心光强比理论模拟稍高.

在光轴上 $z=75\text{ mm}$ 处放置边长为 0.2 mm 的方形障碍物, 方形障碍物后的光强分布如图 9 所示, 由图 9 可以看出一阶 Bessel 光束在遇到方形障碍物后也发生了自再现现象, 且自再现过程与图 5 中圆形障碍物后一阶 Bessel 光束自再现过程相类似.

4 结论

基于 Hankel 波理论分析了非相干光源产生高阶 Bessel 光束实现自再现的可能性, 并利用交叉谱密度理论数值模拟了一阶 Bessel 光束经过轴上圆形障碍物后的自重建过程, 通过数值模拟可以看出非相干光源产生的高阶 Bessel 光束具有自再现特性. 实验上通过使绿光 LED 光源发出光波经过螺旋相位板和轴棱锥产生一阶 Bessel 光束, 并在轴上放置圆形和方形障碍物进行自再现实验, 实验结果表明绿光 LED 产生的一阶 Bessel 光束遇到障碍物后能够进行自再现, 与完全相干的一阶 Bessel 光束最小自再现距离基本相同, 但自再现光束的长度比完全相干情况下要小, 且随着障碍物与轴棱锥距离的增加, 障碍物后相同距离处自再现的一阶 Bessel 光束的中心光强逐渐

图 9 (网络版彩图)实验拍摄轴上方形障碍物不同距离处截面光强

(a) $z=75\text{ mm}$; (b) 在 $z=75\text{ mm}$ 处放置方形障碍物; (c) $z=85\text{ mm}$; (d) $z=105\text{ mm}$; (e) $z=120\text{ mm}$

Figure 9 (Color online) Cross section intensity distributions in experiment at different distances with on-axis square obstacle. (a) $z=75\text{ mm}$; (b) $z=75\text{ mm}$ with on-axis square obstacle; (c) $z=85\text{ mm}$; (d) $z=105\text{ mm}$; (e) $z=120\text{ mm}$.

增加, 光斑中心梯度逐渐降低, 对比度逐渐降低, 实验结果与理论模拟基本吻合. 若用非相干光源产生的高阶 Bessel 光束构建光镊系统不仅可以利用其自再现特性实现大范围、多层面的粒子俘获, 还可以利用高阶 Bessel 光束自带轨道角动量实现粒子的旋转, 并且部分相干的高阶 Bessel 光束的受散斑影响较小, 成本较低的非相干 LED 的光源也极易获得, 研究结果为利用非相干光源产生高阶 Bessel 光束实现多层面的粒子操控提供有力的实验和理论依据.

参考文献

- 1 Ritesh A, Kosta L, Yael R, et al. Manipulation and assembly of nanowires with holographic optical traps. *Opt Express*, 2005, 13: 8906–8912
- 2 David G G. A revolution in optical manipulation. *Nature*, 2003, 424: 810–816
- 3 Leake K D, Hawkins A R, Schmidt H. All-optical particle trap using orthogonally intersecting beams. *Photon Res*, 2013, 1(1): 47–51
- 4 Mazilu M, Stevenson D J, Gunn-Moore F, et al. Light beats the spread: “non-diffracting” beams. *Laser Photon Rev*, 2010, 4(4): 529–574
- 5 Jack N, Lin Z F, Chan C T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 1–4
- 6 Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Opt Express*, 2004, 12(22): 5448–5456
- 7 Florian O F, Philipp S, Alexander R. Microscopy with self-reconstructing beams. *Nat Photon*, 2010, 204: 1–6
- 8 Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T, et al. Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam (in Chinese). *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]
- 9 Fan D D, Zhang Q A, Cheng Z M, et al. Simulation and experimental confirmation on the reconstruction of Bessel beams (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61(16): 164103 [范丹丹, 张前安, 程志明, 等. Bessel 光束的自重建的模拟仿真与实验验证. *物理学报*, 2012, 61(16): 164103]
- 10 Garcés-Chavez V, McGolin D, Melville H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam.

- Nature, 2002, 419: 145–147
- 11 Gao W, Hu X B, Sun D, et al. Simultaneous generation and Brillouin amplification of a dark hollow beam with a liquid-core optical fiber. *Opt Express*, 2012, 20(18): 20715–20720
 - 12 Yin L H, Li Y M, Lou L R, et al. Experimental research of doughnut, a new kind of laser trap (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2003, 30(3): 211–215 [尹良红, 李银妹, 楼立人, 等. 空心新型光阱的实验研究. *中国激光*, 2003, 30(3): 211–215]
 - 13 Cedric B, Branislav G, Christoph M, et al. Extended focus high-speed swept source OCT with self-reconstructive illumination. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12141–12155
 - 14 Florian O, Vasily G, Kevin A, et al. Self-reconstructing sectioned Bessel beams offer submicron optical sectioning for large fields of view in light-sheet microscopy. *Opt Express*, 2013, 21(9): 11425–11440
 - 15 吕百达. 激光光学. 北京: 高等教育出版社, 2003. 199
 - 16 Pu J X, Dong M M, Wang T. Generation of adjustable partially coherent Bessel beams by use of an axicon-lens system. *Appl Opt*, 2006, 45(29): 7553–7556
 - 17 Fan D D, Wu F T, Cheng Z M, et al. Reconstruction of incoherent source Bessel beam (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62(10): 104219 [范丹丹, 吴逢铁, 程治明, 等. 非相干光源无衍射光的自重建. *物理学报*, 2013, 62(10): 104219]
 - 18 Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, et al. Non-diffracting Bessel-like beam generated by green LED source (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42(8): 805–811 [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(8): 805–811]
 - 19 Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, et al. A precise method for analyzing Bessel-like beams generated by broadband waves. *Opt Laser Technol*, 2013, 52: 87–90
 - 20 Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Opt Commun*, 2000, 177: 297–301
 - 21 Cui S W, Chen Z Y, Pu J X. Red LED light source generates partially coherent vortex beams (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2012, 39: s202004 [崔省伟, 陈子阳, 蒲继雄. 红色 LED 光源产生部分相干涡旋光束. *中国激光*, 2012, 39: s202004]
 - 22 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009
 - 23 Fang X, Wu F T, Chen Z M. Effects of incoherent monochromatic LED light source on formation of Bessel beam (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 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. *光学学报*, 2013, 33(2): 0205001]
 - 24 Chen G M, Hua L M, Lin H C, et al. Experimental investigation on partially coherent higher-order non-diffractive beams. *Chin Phys B*, 2011, 20(9): 094203

Self-reconstruction of high-order Bessel beams generated by green LED light source

HE Xi, WU FengTie^{*}, LI Pan & SUN Chuan

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

Based on the Hankel wave theory, the possibility of self-reconstruction of incoherent source high-order Bessel beams is analyzed. The cross-section light intensity distribution of first-order Bessel beam generated by green LED light source after on-axis circular obstacle is simulated by cross-spectral density function. In the experimental aspect, we lead the light generated from green light source passing through spiral phase plate and axicon to generate first-order Bessel beams, and put a circular obstacle and a square obstacle on the axis respectively, to demonstrate the self-reconstruction property of incoherent source high-order Bessel beams. The experimental results are accorded well with the theoretical simulation. The research result has an important reference value for the micromanipulation of particles in multiple planes by using incoherent light.

high-order Bessel beams, green LED light source, self-reconstruction, axicon, spiral phase plate

PACS: 42.15.-i, 42.25.Fx, 42.25.Kb, 42.25.-p