

非相干单色 LED 光源对贝塞尔光束形成的影响

方 翔 吴逢铁 程治明

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 基于部分相干光理论研究了非相干单色 LED 光源的空间相干特性对无衍射 Bessel 光束形成的影响。部分相干光经过轴棱锥, 光强分布函数中出现了高阶的 Bessel 函数项, 其光强为各阶 Bessel 函数的线性叠加。数值模拟了部分相干光通过轴棱锥后的光场分布, 发现空间相干长度越小, 高阶项造成的影响越大, 所形成的光束与理想 Bessel 光束的差异越明显, 暗环处光强不再为零, 截面光强分布图越模糊。通过一套可调控光束空间相干长度的实验室装置, 产生了较为理想的 Bessel 光束, 实验结果与理论模拟相符。

关键词 激光光学; 贝塞尔光束; LED 光源; 部分相干光; 空间相干性

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0205001

Effects of Incoherent Monochromatic LED Light Source on Formation of Bessel Beam

Fang Xiang Wu Fengtie Cheng Zhiming

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

Abstract Based on the theory of partially coherent light, this article studies the influence of the spatial coherence of incoherent monochromatic LED light source on the generation of Bessel beam. When the partially coherent light goes through an axicon, higher-order Bessel functions appear in the light intensity distribution, and the light intensity is the linear superposition of each-order Bessel functions. Light intensity distributions are numerically simulated. The result shows that the shorter initial coherent length is, the greater the effect of high-order derivatives is, and more obvious the difference between Bessel beam and the ideal Bessel is, and that the light intensity is non-zero in dark rings and section of light distributions is fuzzier. Through an experimental setup that can regulate initial coherent length of light, nearly ideal Bessel beam is generated. The experimental results agree with theoretical analysis.

Key words laser optics; Bessel beam; LED source; partially coherent beam; spatial coherence

OCIS codes 020.1670; 030.1640; 080.4298; 050.1970

1 引 言

自无衍射 Bessel 光束由 Durnin 等^[1]于 1987 年首次提出以来, 因其在传播过程中不发散和自重建的特性, 而被广泛用于光学俘获和操作^[2]、光学相干断层扫描^[3]和干涉测量^[4]等领域。Bessel 光束的独特性质及广阔的应用前景, 引起了人们极大的兴趣, 研究者提出了众多产生 Bessel 光束的方法。

由于 Bessel 光束的形成与光源的相干性相关, 所以, 迄今为止人们的研究工作主要集中在利用相干光源——激光来产生 Bessel 光束^[5,6]。利用非相干光源产生 Bessel 光束的研究甚少。在目前仅有的几篇研究报道中^[7,8], 研究者用卤灯、LED 等非相干光源产生了 Bessel 光束, 但研究的重点在于怎样产生 Bessel 光束, 而光源的空间相干性对 Bessel 光

收稿日期: 2012-07-28; **收到修改稿日期**: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(60977068, 61178015)、福建省自然科学基金项目(2012J01278)和泉州市科技重点项目(2011G9)资助课题

作者简介: 方 翔(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光束传输与变化的理论和技术等方面的研究。

E-mail: asjna@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(通信联系人)

束强度分布、最大无衍射距离的影响仍没有很好的解释。程治明等^[9,10]利用准单色 LED 光源照射轴棱锥形成了 Bessel 光束,并分析了光束的形成是将准单色光分解为不同频率单色光的线性组合,并将轴棱锥后的光强分布视为不同频率零阶 Bessel 光束的线性叠加,认为光束截面光强环数减少是因为不同频率单色光所产生的 Bessel 光束亮暗环相互错开,导致截面光强图明暗对比度降低、图样清晰度下降。但单色 LED 作为准单色光源,频谱极窄(光谱带宽一般都在 10^{12} Hz 量级),带宽对 Bessel 光束形成及强度分布的影响应很小,而且作为典型的非相干光源,其空间相干性的变化对经过轴棱锥的光束强度分布有着重要的影响。本文从非相干 LED 光源的空间相干性出发,根据部分相干光理论研究了空间相干长度的变化对 Bessel 光束形成及强度的分布的影响。结果表明空间相干性越好,所形成的无衍射光束就越接近理想 Bessel 光束,截面光强分布图也越清晰。

2 理论分析

2.1 LED 光场空间相干性的分析

根据范西泰特-策尼克定理,非相干光源发出的光在传输之后变为部分相干光,且部分相干光的空间相干性决定于光源发光区域的大小,同时也与空间传播距离有关。由文献[11,12]知,在空间传播距离不变的情况下,LED 光源的大小(即光源线度)直接决定了部分相干光的空间相干性,光源线度越小,光场的空间相干性越强,反之光场的空间相干性越差。当发光区域的大小固定不变时,LED 光源发出的辐射光随着空间传输距离的增加,其空间相干性相应的增强。根据空间相干性的反比公式得知

$$\frac{bd}{D} \approx \lambda, \quad (1)$$

式中 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。当空间传输距离满足 $D \geq \frac{bd}{\lambda}$ 时,位于 D 处的光场将具有明显的空间相干特性。因此可以通过控制 LED 光源的大小及空间传播距离来提高光场的空间相干性,如图 1 所示。

图 1 中 P_1 、 P_2 分别为位于 Z_1 、 Z_2 处的光阑。调

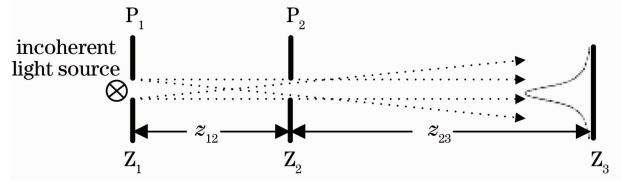


图 1 光场空间相干性调制器

Fig. 1 Modulator of light field spatial coherence

节 P_1 的孔径大小可控制通过 P_1 处的次光源的线度大小; z_{12} 为光束空间传输距离; 光阑 P_2 对次光源的线度大小进行二次限制。适当调节两个光阑孔径的大小及间距,可以有效提高准单色 LED 经过两个光阑后的空间相干性,经过两个光阑后的光场可视为部分相干光场。

2.2 部分相干光通过轴棱锥后的光场分布

由 McMorran 等^[13,14]的研究可知,高斯-谢尔模型(GSM)光束能够有效模拟非相干光通过两个光阑后部分相干光的光场分布,因此本文以 GSM 光束替代非相干 LED 光源通过两个光阑后的光场,则 LED 光源经过两个光阑后的光场的交叉谱密度函数为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = I_0 \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\sigma_1^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{2\sigma_2^2}\right], \quad (2)$$

式中 I_0 为平均光强的正常数, \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 为横向位置矢量, σ_1 为束腰宽度, σ_2 为空间相干长度。

已知轴棱锥的振幅透射率为

$$t(r) = \begin{cases} \exp[ik\phi(r)], & (r \leq R) \\ 0, & (r > R) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\phi(r) = -(n-1)\gamma r$, n 和 γ 分别为轴棱锥的折射率和底角(锥面与底面的夹角), R 为通过轴棱锥的光束半径。假设光束的束腰位于轴棱锥平面($z = 0$)处,则部分相干光通过轴棱锥线聚焦,将形成一段最大无衍射距离为 z_{\max} 的菱形区域,如图 2 所示。

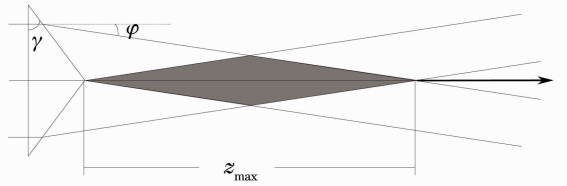


图 2 部分相干光通过轴棱锥的线聚焦光路图

Fig. 2 Partially coherent light focused by an axicon
轴棱锥后的部分相干光的交叉谱密度函数为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z_{01}}\right)^2 \iiint W(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, z) t(r_1) t(r_2) \exp\left\{-\frac{ik}{2z_{01}}[(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}'_1)^2 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}'_2)^2]\right\} d^2 r'_1 d^2 r'_2. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,当 $r_1 = r_2 = r$,通过傅里叶变换得到光场强度为^[15]

$$S(r, z) = I_0 \left(\frac{k}{2\pi z_{01}} \right)^2 \iint C(r'_1, r'_2, r, z) \exp[-ik(\phi r'_1 - \phi r'_2)] r'_1 r'_2 dr'_1 dr'_2, \quad (5)$$

式中

$$C(r'_1, r'_2, r, z) = (2\pi)^2 \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{\sigma_1^2} + \frac{r_1^2 + r_2^2}{2\sigma_2^2}\right)\right] \times \left[J_0\left(i\frac{r'_1 r'_2}{\sigma_2^2}\right) J_0\left(\frac{krr'_1}{z}\right) J_0\left(\frac{krr'_1}{z}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} 2i^{-n} J_n\left(i\frac{r'_1 r'_2}{\sigma_2^2}\right) J_n\left(\frac{krr'_1}{z}\right) J_n\left(\frac{krr'_1}{z}\right) \right], \quad (6)$$

$$\phi(r'_i) = \phi(r'_i) + \frac{r_i^2}{2z}. \quad (7)$$

由几何关系可得,半径为 R 的光束平行入射轴棱锥后,出射光线的偏转角 $\varphi \approx (n-1)\gamma$,则最大无衍射距离为 $z_{\max} = \frac{R}{\varphi} = \frac{R}{(n-1)\gamma}$ 。但由参考文献

[16]可知,受到相干长度 σ_2 的影响,入射轴棱锥的光束半径 R 变为有效光束半径 σ_{eff} ,即 $\sigma_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{4\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}\right)^{-1/4}$ 。则最大无衍射距离为

$$z_{\max} = \frac{\sigma_{\text{eff}}}{\phi} = \frac{1}{(n-1)\gamma} \left(\frac{1}{4\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}\right)^{-1/4}. \quad (8)$$

由(5)、(6)式可知,不同于理想的完全相干光经过轴棱锥时光强分布函数中只含有零阶的 Bessel

函数项,部分相干光经过轴棱锥时,其光强分布函数中出现了高阶的 Bessel 函数项,且光强为各阶 Bessel 函数的线性叠加。

3 数值仿真与实验结果

3.1 部分相干光照射轴棱锥的数值仿真

取参量 $n = 1.458$, $\lambda = 531 \text{ nm}$, $\gamma = 1^\circ$, $R = 1.8 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 1.8 \text{ mm}$, $\sigma_2 = 2 \text{ mm}$, z 分别取 70、90、110、150、190、220 mm,按(5)、(6)式进行模拟仿真,得到不同位置处的光束截面光强分布图,如图 3 所示。

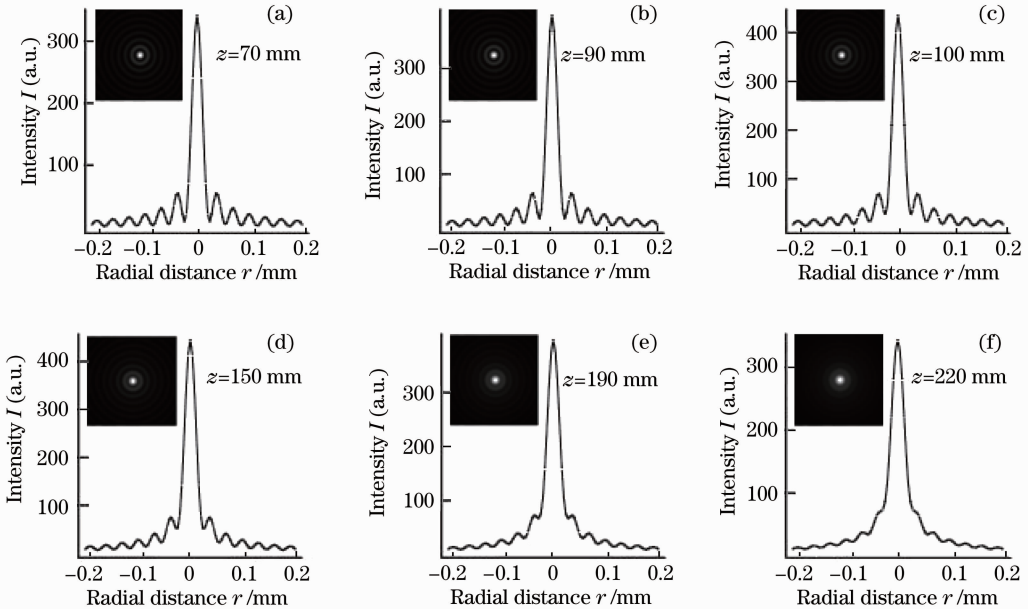


图 3 不同位置处的光强截面图

Fig. 3 Intensity cross section at different positions

由图 3 可以看出部分相干光经过轴棱锥形成了近似 Bessel 光束,且随着传播距离的增加截面光强沿径向波动逐渐变得平缓,外环将逐渐变得模糊。

为考察不同相干度对 Bessel 光束的影响,改变

空间相干长度对 $z = 190 \text{ mm}$ 处的截面光强分布进行模拟,分别取 $\sigma_2 = \infty, 4.5, 3, 2, 1.5 \text{ mm}$,按(5)、(6)式进行模拟仿真,得到不同空间相干度下的光束截面光强分布图,如图 4 所示。

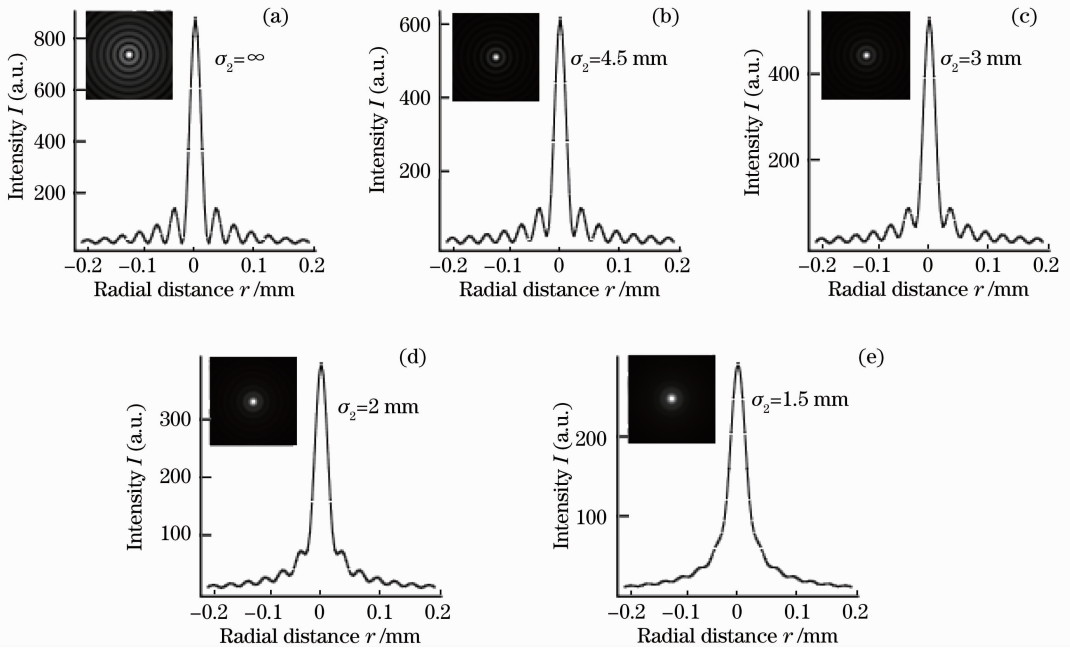


图 4 不同空间相干长度下的光强截面图

Fig. 4 Intensity cross section at different spatial coherence lengths

由图 4 可知,在 $\sigma_2 = \infty$,即完全相干光照射时,形成了理想的 Bessel 光束。当 $\sigma_2 \neq \infty$,即部分相干光照射时,截面光强分布与理想 Bessel 光束截面光强分布相比较模糊。这是因为受(6)式中高阶项的影响,在暗环处,光强不为零。且随着相干长度 σ_2 的减小,这种变化越发明显。

3.2 实验设计及结果分析

由 2.1,2.2 节的分析可知,光源发光区域、光阑孔径、空间传输距离都影响着空间相干性。为了能

获取良好的 Bessel 光束。实验中采用实验装置如图 5 所示。同时,为了避免光阑孔径太小导致入射

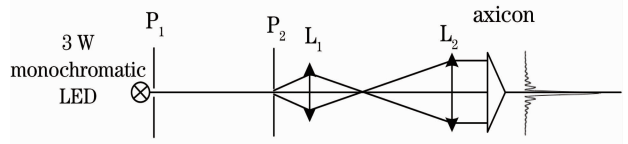


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

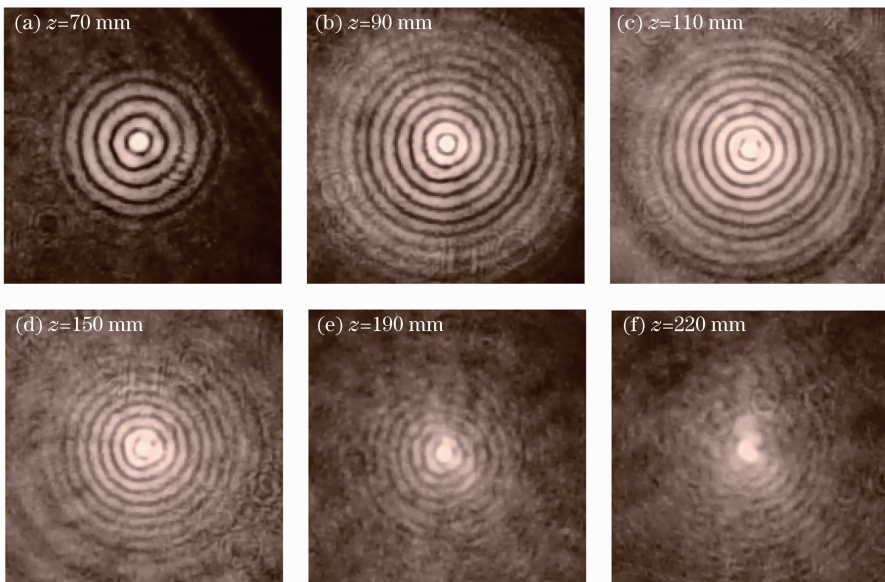


图 6 实验所得不同位置处的光强截面图

Fig. 6 Intensity cross section at different positions

光强太弱,造成记录困难,采用一颗 3W 大功率单色 LED 用于实验。

图中光阑 P_1 、 P_2 的孔径大小分别为 $d_1 = 2 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 0.1 \text{ mm}$ ； P_1 与 P_2 的间距为 320 mm,满足 $D \geq \frac{bd}{\lambda}$ 的要求； L_1 、 L_2 分别是焦距为 $f_1 = 15 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 190 \text{ mm}$ 的凸透镜,在光路中作为准直扩束系统；轴棱锥底角 $\gamma = 1^\circ$ 。图 6 为在轴棱锥后不同距离处拍得的截面光强分布图。

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 6 可以看出实验与理论较为符合。根据(8)式,计算出 $Z_{\max} = 221.885 \text{ mm}$,对图 6 可知实验所得无衍射距离与理论基本符合。

按照图 5 的实验装置改变光阑孔径大小,在轴棱锥后的 70 mm 处拍得截面光强分布图,如图 7 所示。对比图 4 可知,随着光阑孔径的增大,光束的空间相干性变差,在(6)式中高阶项的影响下与理想 Bessel 光束的差异性也随之增大。

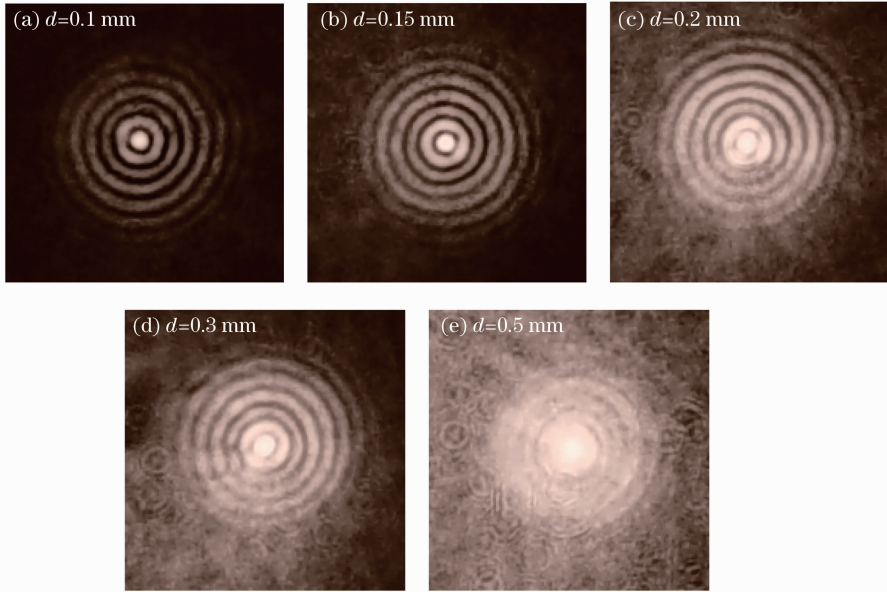


图 7 不同光阑孔径下的光强截面图

Fig. 7 Intensity cross section under different aperture sizes

4 结 论

对非相干单色 LED 光源的空间相干性进行了讨论,光源的线度越小,其空间相干性越强;空间传输距离越大,光束的空间相干性也越强。并从部分相干理论出发,分析了空间相干度对 Bessel 光束形成造成的影响——部分相干光经过轴棱锥,光强分布函数中出现了高阶的 Bessel 函数项,高阶项的出现使所形成的 Bessel 光束截面光强分布图变得模糊。空间相干长度的值越大,光强分布越接近理想的 Bessel 光束。设计了一套可调控 LED 光源辐射光空间相干性的实验装置,通过调控入射光束的空间相干度成功产生了无衍射 Bessel 光束。

参 考 文 献

- 1 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 2 V. Garcés-Chávez, D. McGloin, H. Melville *et al.*.

Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419** (6903): 145~147

- 3 K. S. Lee, J. P. Rolland. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1696~1698
- 4 M. Fortin, M. Piché, E. F. Borra. Optical tests with Bessel beam interferometry [J]. *Opt. Express*, 2004, **12** (24): 5887~5895
- 5 Zheng Weitao, Wu Fengtie, Zhang Qian'an *et al.*. The new technique for generating non-diffracting beam with long propagation distance using two axicons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(14): 144201
- 6 郑维涛, 吴逢铁, 张前安 等. 双轴棱锥产生长距离近似无衍射光的新技术[J]. *物理学报*, 2012, **61**(14): 144201
- 6 Wu Fengtie, Ma Liang, Zhang Qian'an *et al.*. Experimental and theoretical study on the reconstruction of focused high order [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(1): 014202
- 7 吴逢铁, 马亮, 张前安 等. 聚焦高阶贝塞尔-高斯光束重建的理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(1): 014202
- 7 P. Fischer, C. Brown, J. Morris *et al.*. White light propagation invariant beams [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6657~6666
- 8 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Zheng Weitao *et al.*. Theory and

- experiment of generation Bessel beam by thermal light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0726001
- 程治明, 吴逢铁, 郑维涛等. 热光源产生 Bessel 光束的理论及实验[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0726001
- 9 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fan Dandan *et al.*. Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source [J]. *Sci. China 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[J]. 中国科学, 2012, **42**(8): 805~811
- 10 Zhai Zhongsheng, Zhao Bin. Diffraction property of an axicon in quasi-monochromatic light [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 274
- 翟中生, 赵 斌. 准单色光照射轴锥镜的衍射特性[J]. 激光技术, 2008, **32**(3): 274
- 11 Lin Huichuan, Tao Hua, He Meng *et al.*. Spatial coherence of high-power single-color LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0323003
- 林惠川, 陶 华, 贺 盟等. 大功率单色 LED 的空间相干特性[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0323003
- 12 Qin Yi. Research of Digital Holography Based on Partial Coherent Source of LED [D]. Guangzhou: Jinan University, 2010. 39~42
- 秦 怡. LED 弱相干光数字全息研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010. 39~42
- 13 B. McMorran, A. D. Cronin. Gaussian Schell source as model for slit-collimated atomic and molecular beams [OL]. <http://arXiv.org/abs/0804.1162>
- 14 B. McMorran, A. D. Cronin. Model for partial coherence and wavefront curvature in grating interferometers [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(1): 013601
- 15 A. A. Alkelly, M. Shukri, Y. S. Alarify. Intensity distribution and focal depth of axicon illuminated by Gaussian Schell-model beam [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4658~4662
- 16 K. Sundar, R. Simon, N. Mukunda. Twisted Gaussian Schell-model beams. II. spectrum analysis and propagation characteristics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(9): 2017~2023

栏目编辑: 宋梅梅