

# 红色 LED 光源产生部分相干涡旋光束

崔省伟 陈子阳 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要** 利用大功率单芯片红色发光二极管(LED)辐射出的光,入射到螺旋相位板,获得 LED 部分相干涡旋光。通过调节光的传输距离,获得不同相干度的部分相干光,分析并观察相干度对红光 LED 部分相干涡旋光束的影响。此外,还研究了涡旋光束拓扑荷数对部分相干涡旋光束光强分布的影响。实验结果和理论模拟基本一致。

**关键词** 光学器件;发光二极管;相干光学;部分相干;涡旋光束

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s202004

## Red LED Light Source Generates Partially Coherent Vortex Beams

Cui Shengwei Chen Ziyang Pu Jixiong

(Department of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract** Partially coherent vortex beams are generated under the illumination of high power red-color light-emitting diodes (LED). The influence of the correlation property of partially coherent vortex beam, which can be modulated by adjusting the propagation distance, on the intensity distribution is studied. The effect of the topological charge of vortex beam on the intensity is investigated as well. The experimental results are consistent with the theoretical simulations.

**Key words** optical devices; light-emitting diodes; coherence optics; partially coherence; vortex beam

**OCIS codes** 030.1640; 050.4865; 260.3160; 110.4980

## 1 引言

具有  $\exp(il\theta)$  的相位因子的光束被称为涡旋光束,该光束的相位呈螺旋型的分布,其中  $l$  为拓扑电荷数,光束中的每个光子携带有  $lh$  轨道角动量,因此在信息编码、空间光通信和光学扳手等领域得到了应用<sup>[1~7]</sup>。部分相干光束由于具有抗散斑等众多优点引起了研究人员的广泛关注。例如,Wu<sup>[8]</sup>提出部分相干光束的光强分布在湍流介质中传输时受到湍流的影响比完全相干光要小。由于涡旋光束和部分相干光束的特殊性质,Palacios 等<sup>[9~15]</sup>分别对部分相干涡旋光束的相干涡旋性质进行了相关研究。然而,目前大部分关于部分相干涡旋光束的研究工作都局限于理论研究。

作为一种重要的光源,LED 由于其节能环保以

及长寿命等众多优点以及在光纤通信等众多领域的广泛应用,越来越受到研究者的重视<sup>[16~18]</sup>。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特性,可以视为部分相干光源。本文以 LED 光源作为部分相干光源,获得部分相干涡旋光束。从理论和实验研究光源的相干特性以及涡旋光束的拓扑荷数对部分相干涡旋光束光强的影响。

## 2 实验装置与理论分析

以高功率单灯红色 LED 作为光源,其光谱分布如图 1 所示,可近似看做以 625 nm 为中心波长的高斯型分布。

根据图 1 实验测量的红光 LED 光谱,将其近似看做高斯形式,并进行了理论模拟,表达式为

**收稿日期:** 2012-05-20; **收到修改稿日期:** 2012-07-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(60977068,61178015)资助课题。

**作者简介:** 崔省伟(1988—),男,硕士研究生,主要从事传输光学方面的研究。E-mail: bug\_swei@163.com

**导师简介:** 蒲继雄(1962—),男,博士,教授,主要从事光束传输与非线性光学方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn  
(通信联系人)

$$S(\lambda) = \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\omega_\lambda^2}\right]. \quad (1)$$

根据实验测量的谱线,选用参量中心波长  $\lambda_0 = 625 \text{ nm}$ ,半峰全宽  $\omega_\lambda = 25 \text{ nm}$  进行模拟。图 1 中实线为实验所测的光谱,虚线为(1)式的模拟结果,从图 1 中可以看出理论模拟曲线和实验观测曲线基本一致。

实验原理图如图 2 所示,由红光 LED 光源辐射出的完全非相干光,经过空间传输,再通过光阑,获得部分相干光束,光束半径由光阑决定。该部分相干光束入射到螺旋相位板(SPP)上,获得 LED 部分相干涡旋光束,并由 CCD 进行记录。通过改变光阑、螺旋相位板和 CCD 的整体位置,可以改变光束的相干度,从而得到不同相干特性的涡旋光束。根据图 2 进行了相应的理论计算。

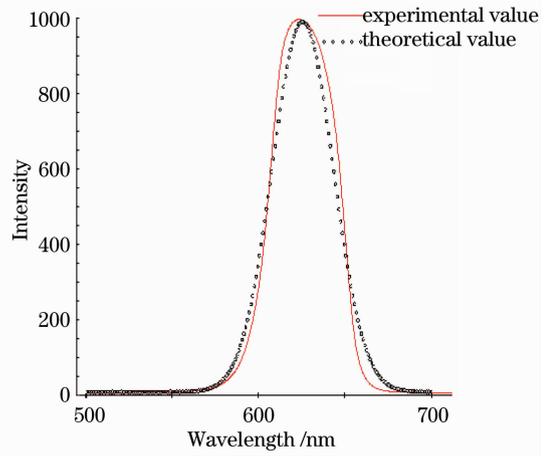


图 1 实验测量与理论模拟红光 LED 光谱特性  
Fig. 1 Spectral characteristics of red LED

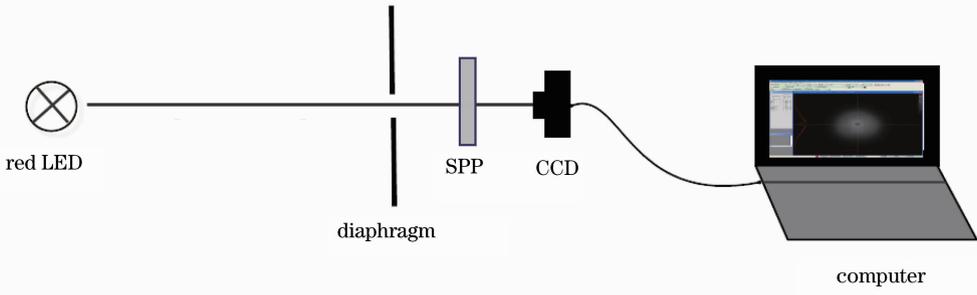


图 2 红光 LED 产生涡旋的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of generation of partial coherence vortex beam using LED

利用双缝干涉实验,可以对相干度进行测量。图 3 中的点为在放置光阑处所测得的红色 LED 光的相干长度。可以看出实验上所测量的相干特性呈高斯型衰减。根据高斯型相干度分布函数对其进行模拟。高斯型的相干度分布函数可以表示为

$$\mu(\rho_1, \rho_2, z = 0) \exp\left\{-\frac{[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)]}{\delta^2}\right\}, \quad (2)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2$  为入射平面的位置坐标,  $\delta$  为相干长度(即复空间相干度的束腰宽度)。从图 3 中可以看出,理论模拟曲线和实验测量点基本一致。

由于红光 LED 的光谱具有一定的宽度,不能看做准单色光,但红光 LED 的光谱与螺旋相位板匹配波长  $633 \text{ nm}$  的偏差在  $\pm 25 \text{ nm}$  内,可近似为涡旋相位板的匹配波长,因此将其部分相干涡旋光束的

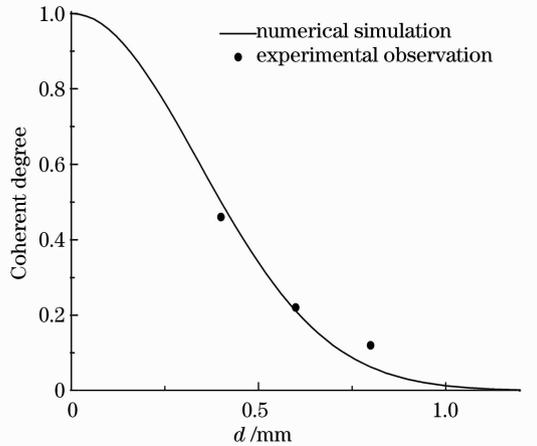


图 3 红色 LED 光的相关特性  
Fig. 3 Correlation property of red LED

交叉谱密度可以表示为

$$W(\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2, z = 0) = S(\lambda) \left(\frac{\rho_1}{w}\right)^l \left(\frac{\rho_2}{w}\right)^l \exp\left(-\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{w^2}\right) \exp\left\{-\frac{[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)]}{\delta^2}\right\} \times \exp[-il(\theta_1 - \theta_2)], \quad (3)$$

式中  $w$  为光斑大小。

基于交叉谱密度公式,自由空间中传输一段距离  $z$  后的交叉谱密度可以表示为<sup>[14]</sup>

$$W(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, z) = \int \left( \frac{1}{\lambda z} \right)^2 \iiint W(\rho_1, \rho_2, \theta_1, \theta_2, z=0) \times \exp \left\{ -\frac{i\pi}{\lambda z} \left[ \rho_1^2 + r_1^2 - 2\rho_1 r_1 \cos(\theta_1 - \varphi_1) \right] - \left[ \rho_2^2 + r_2^2 - 2\rho_2 r_2 \cos(\theta_2 - \varphi_2) \right] \right\} d\rho_1 d\rho_2 d\theta_1 d\theta_2 d\lambda. \quad (4)$$

式中  $r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2$  为接收平面的位置坐标。可以将(4)式改写为

$$W(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, z) = \int \left( \frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \exp \left[ -\frac{i\pi}{\lambda z} (r_1^2 - r_2^2) - \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\omega_\lambda^2} \right] \sum_{m=-\infty}^{\infty} \iint \left( \frac{\rho_1}{w} \right)^{l_m} \left( \frac{\rho_2}{w} \right)^{l_m} \times \exp \left[ -\left( \frac{1}{w^2} + \frac{1}{\delta^2} \right) (\rho_1^2 + \rho_2^2) \right] \exp \left[ -\frac{i\pi}{\lambda z} (\rho_1^2 - \rho_2^2) \right] J_m \left( \frac{2\pi\rho_1 r_1}{\lambda z} \right) J_m \left( \frac{2\pi\rho_2 r_2}{\lambda z} \right) I_{l+m} \left( \frac{2\rho_1 \rho_2}{\delta^2} \right) \times \exp[-im(\varphi_1 - \varphi_2)] \rho_1 \rho_2 d\rho_1 d\rho_2 d\lambda. \quad (5)$$

式中  $J_m$  为  $m$  阶第一类贝塞尔函数,  $I_{l+m}$  为  $l+m$  阶变形第一类贝塞尔函数。令  $r_1 = r_2 = r, \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$ , 则  $z$  位置处的光强表达式为

$$I(r, \varphi, z) = W(r, r, \varphi, \varphi, z), \quad (6)$$

根据(6)式对红光 LED 部分相干涡旋的光强进行模拟。

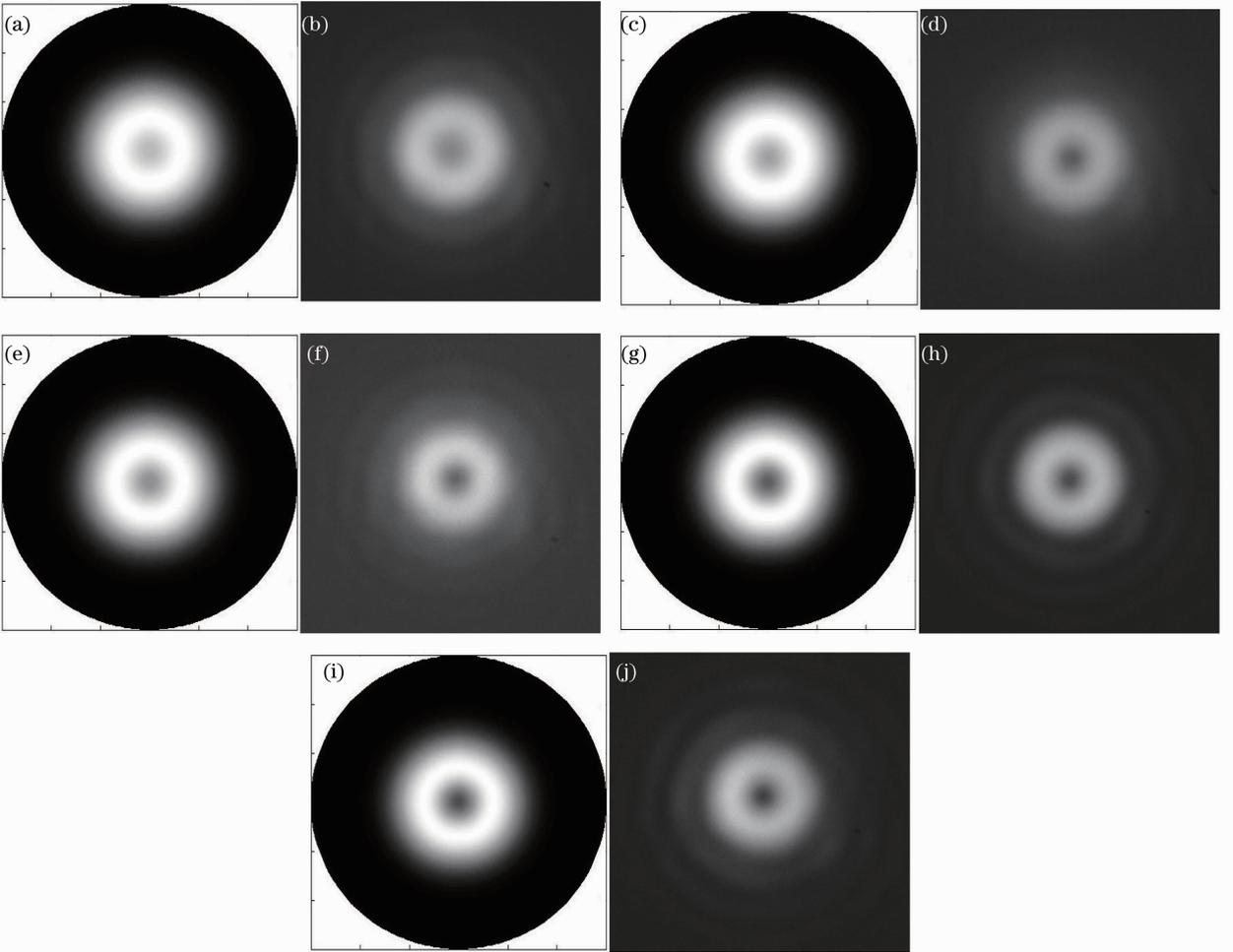


图4 LED部分相干涡旋光束的光强分布。(a),(c),(e),(g),(i)为理论模拟;(b),(d),(f),(h),(j)为实验结果。相干长度分别为(a),(b) $\delta=0.4292$  mm;(c),(d) $\delta=0.4811$  mm;(e),(f) $\delta=0.5244$  mm;(g),(h) $\delta=0.7068$  mm;(i),(j) $\delta=0.7808$  mm。其他参量为 $l=1$

Fig.4 Light intensity of LED partially coherent vortex beams. (a),(c),(e),(g),(i) Theoretical simulation; (b),(d),(f),(h),(j) experimental results. The coherent lengths are (a),(b) $\delta=0.4292$  mm;(c),(d) $\delta=0.4811$  mm;(e),(f) $\delta=0.5244$  mm;(g),(h) $\delta=0.7068$  mm;(i),(j) $\delta=0.7808$  mm. Other parameter  $l=1$

### 3 实验结果

改变光阑、螺旋相位板和 CCD 的位置,目的是实现对光束相干特性的调节,并利用双缝的干涉条纹,计算出在光阑处(即入射光束)的相干度。空间

传输距离越近相干度越低,传输距离越远相干度越高。实验测得 LED 光传播距离与相干长度的对应情况如表 1 所示。

表 1 红色 LED 光传播不同距离时的相干长度

Table 1 Corresponding relation between coherent lengths and propagation distance

Distance /m	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Coherent length /mm	0.4292	0.4811	0.5244	0.7068	0.7808

图 4 为拓扑电荷数  $l=1$ ,相干度不同的部分相干涡旋光束的光强分布图,从中可以看出随着 LED 光传输距离的增加,相干长度的增大,涡旋的中心光强变小,对比度提高。根据实验参数模拟的数值结果,和实验结果基本一致。

出相干度不变的情况下,涡旋的阶数越高,中心光强越小,中心暗斑越大,涡旋光的直径也越大,实验结果和理论模拟基本吻合。图 4、5 中的实验结果中出现了衍射环,这是由于实验中加入了尺寸较小的光阑,使得光束发生较强的衍射效应,因而在实验结果中有衍射环出现。

图 5 为在相干长度  $\delta=0.7068$  mm,涡旋阶数不同的部分相干涡旋光束的光强分布图,从中可以看

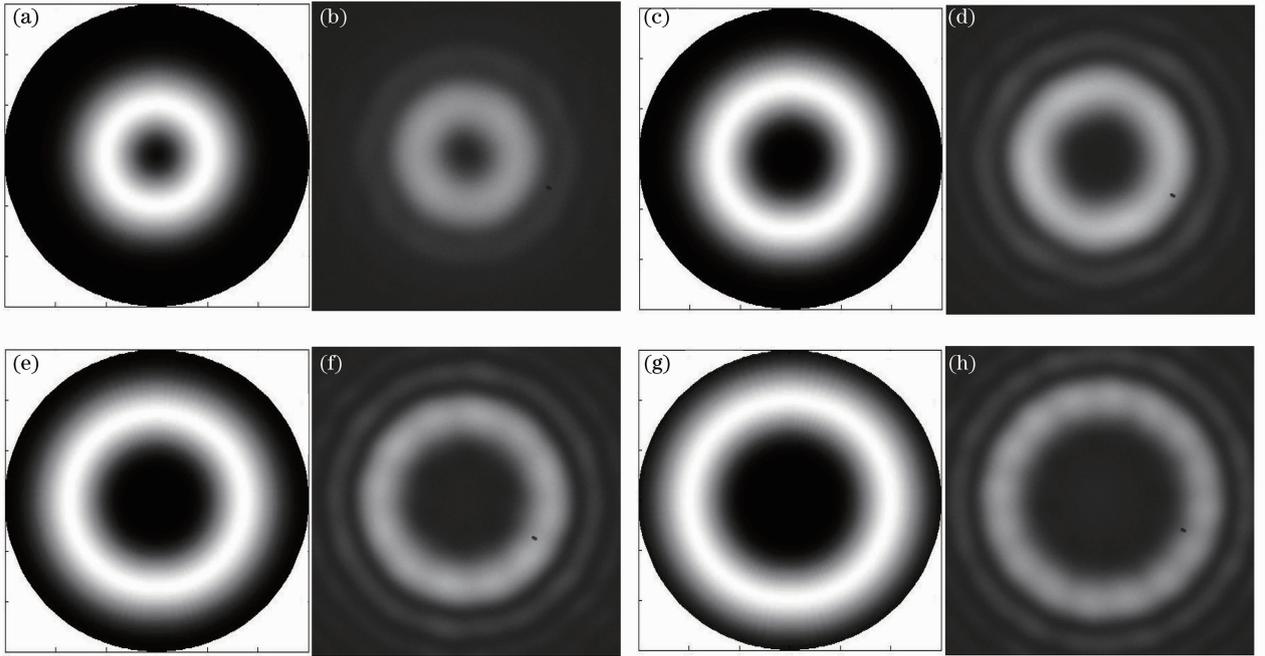


图 5 相干长度  $\delta=0.7068$  mm,LED 部分相干涡旋光束的截面光强分布。(a),(c),(e),(g)为理论模拟;(b),(d),(f),(h)为实验结果。拓扑电荷分别为(a),(b)  $l=2$ ;(c),(d)  $l=4$ ;(e),(f)  $l=6$ ;(g),(h)  $l=8$

Fig. 5 Light intensity of LED partially coherent vortex beams when coherent length  $\delta=0.7068$  mm. (a), (b), (e), (g) Theoretical simulation; (b), (d), (f), (h) experimental results. Topological charges are (a), (b)  $l=2$ ; (c), (d)  $l=4$ ; (e), (f)  $l=6$ ; (g), (h)  $l=8$

### 4 结 论

从实验上研究红光 LED 部分相干涡旋光束,主要研究了其光强分布随相干特性的变化情况,以及相干度不变时,不同阶数对光强分布的影响。利用传输后的 LED 光获得部分相干光,通过调整光阑和接收的位置,改变光束的相干度,其相干度大小可以

通过测量光束的双缝干涉条纹可见度获得。该部分相干光束入射到螺旋相位板可以获得 LED 部分相干涡旋光束,利用 CCD 测量其光强分布。实验结果表明,随着相干度的变化,其光强分布会出现相应的变化,涡旋光束的中心光强会随着相干度的增加而减弱,理论模拟和实验结果基本一致。理论和实验

得出在相干度比较低的时候,可以通过提高涡旋的阶数来获得对比度更高的空心光束,因此 LED 部分相干高阶涡旋光束更具有应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(11): 8185~8189
- 2 W. J. Firth, D. V. Skryabin. Optical solitons carrying orbital angular momentum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(13): 2450~2453
- 3 J. Courtial, K. Dholakia, D. A. Robertson *et al.*. Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(15): 3217~3219
- 4 G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **88**(1): 013601
- 5 G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett *et al.*. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5448~5456
- 6 Chen Ziyang, Zhang Guowen, Rao Lianzhou *et al.*. Determining the orbital angular momentum of vortex beam by Young's double-slit interference experiment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1063~1067  
陈子阳, 张国文, 饶连周等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1063~1067
- 7 J. Wu, A. D. Boardman. Coherence length of a Gaussian-Schell beam and atmosphere turbulence [J]. *J. Mod. Opt.*, 1991, **38**(7): 1355~1366
- 8 J. Wu. Propagation of Gaussian-Schell beam through turbulent media [J]. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(4): 671~684
- 9 D. M. Palacios, I. D. Maleev, A. S. Marathay *et al.*. Spatial correlation singularity of a vortex field [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(14): 143905
- 10 G. A. Swartzlander, J. Schmit. Temporal correlation vortices and topological dispersion [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(9): 093901
- 11 I. D. Maleev, G. A. Swartzlander. Propagation of spatial correlation vortices [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(6): 915~922
- 12 Cheng Ke, Zhang Hongrun, Lü Baida. Coherence vortex properties of partially coherent vortex beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 246~255
- 13 Cheng Ke, Lü Baida. Spatial correlation properties and correlation vortices of partially coherent vortex beams diffracted by an aperture [J]. *Mod. Opt.*, 2009, **56**(9): 1119~1127
- 14 Hua Limin, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Experimental investigations on partially coherent vortex beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100403  
华黎明, 陈子阳, 蒲继雄. 部分相干涡旋光束的实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100403
- 15 Xianhe Liu, Jixiong Pu. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(27): 26444~26450
- 16 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
- 17 M. S. Andrew, A. S. Gary, M. Joshua. Short-range communication with ultraviolet LEDs [C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 182~193
- 18 Zhao Ming, Xiao Shali, Wang Xi *et al.*. Ultraviolet communication system based on deep LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040602  
赵明, 肖沙里, 王玺等. 基于 LED 的紫外光通信系统研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 040602

栏目编辑: 宋梅梅