

利用非相干光源基于多模光纤获得空心光束

李攀 朱清智 吴逢铁

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,福建 厦门 361021

摘要 提出利用非相干单色发光二极管(LED)光源和多模光纤产生空心光束。证实了将LED光源以一定角度倾斜耦合进大芯径多模光纤可获得光斑均匀的空心光束。分析了光束在多模光纤中的传输路径和产生空心光束的机理,并用Zemax软件建立仿真模型进行模拟。搭建利用LED和多模光纤产生空心光束的实验系统并且与激光作为光源产生的空心光束进行分析比较,结果表明利用LED光源获得的空心光束均匀性更好。

关键词 光纤光学;空心光束;发光二极管光源;多模光纤;非相干

中图分类号 O435.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0422004

Hollow Beam Generated by Incoherent Light Source and Multimode Fiber

Li Pan Zhu Qingzhi Wu Fengtie

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

Abstract A method of generating hollow beam by incoherent monochromatic light emitting diode (LED) light source and multimode fiber is proposed. It is demonstrated that the hollow beam can be obtained by coupling a LED light source into a multimode fiber with a suitable incident angle. The transmission path of beam in multimode fiber and the mechanism of producing hollow beam are analyzed. The simulation model is set up by software Zemax. The experimental system generating hollow beam by LED and multimode fiber is compared with a laser source. The results show that the uniformity of hollow beam obtained by using LED light source is better.

Key words fiber optics; hollow beam; light emitting diode source; multimode fiber; incoherent

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 060.2310

1 引言

空心光束是一种在传播方向上中心光强或者轴向光强为零的环状光束,又被称为暗中空光束^[1],存在相位奇点,具有桶状强度分布、无加热效应、传播不变性和具有自旋与轨道角动量等特殊的物理性质,在微粒子的操控、激光加工、显微学和平版印刷术等^[2-5]领域有着广阔的应用前景。传统获得空心光束的方法有轴棱锥法^[6]、螺旋相位板法^[7]、计算机全息法^[8]等,但是这些元件的转换效率和损伤阈值比较低,损耗较大。近年来人们提出了产生空心光束的新方法,将激光以一定角度倾斜地耦合进入大芯径的多模光纤(MMF)或者液芯光纤从而获得空心光束^[9-10],该方法是以相干性极强的激光作为光源。非相干光具有光强分布比较均匀、波前相位不易发生畸变等特性,对于粒子囚禁、激光光镊等具有较高的应用价值。利用非相干的发光二极管(LED)作为光源基于多模光纤结构获得空心光束的方法目前尚无报道。LED作为一种新型的固态光源由

收稿日期: 2014-11-17; 收到修改稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(61178015)、福建省科技创新平台计划项目(2012H2002)、泉州市科技重点项目(2014Z127)

作者简介: 李攀(1989—),女,硕士研究生,主要从事光束传输与变换方面的研究。

E-mail: ahpanpanli@126.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)

于其节能环保长寿命等众多优点越来越受到重视,本实验室对其有过一些研究^[11-13],如利用LED作为光源获得了零阶与高阶的贝塞尔光束,很好的扩展了LED在光束变换中的应用。本文利用非相干LED作为光源倾斜入射耦合进大芯径的多模光纤而获得空心光束。用Zemax光学设计软件对LED光源经多模光纤后的光场进行模拟,并搭建实验装置进行实验验证,实验结果与模拟仿真基本吻合,研究成果进一步扩展了LED在光束变换中的应用。

2 理论分析

当光束入射到远大于光波长的几百微米量级大芯径多模光纤时,采用几何光学的方法来分析光线在阶跃折射率光纤中的传输特性更加简单直观。在几何光学中,光线的传输可忽略光源的相干性大小,所以采用文献[14]的理论对LED光源在多模光纤中传输进行理论分析。在光纤光学中,当光线入射到多模光纤中时,光纤中传输的光线可以分为子午光线和斜光线。位于子午面内的光线称为子午光线,子午光线的入射光线、反射光线和分界面的法线均在子午面内,如图1(a)所示。光纤中不在子午面内的光线都是斜光线,它和光纤的轴线既不平行也不相交,其光路轨迹是空间螺旋折线,此折线可以是左旋也可以是右旋,如图1(b)所示。

建立坐标系,光纤的端面为 $x-y$, z 轴方向与光纤柱的中心轴方向一致,如图2所示。当光线以离轴方式入射到光纤,入射光线为斜光线,设入射点为 (x_0, y_0) ,入射的光线在端面 $x-y$ 上的投影为一个圆的切线。内切圆的半径设为 r_c ,所以斜光线在传输过程中总与一个半径为 r_c 的筒状的面相切,这个面称为斜光线的焦散面。 r_c 可以用 $r_c = x_0 \sin \alpha - y_0 \cos \alpha$ 表示^[14],其中 α 为入射光线在 $x-y$ 面上的投影与 x 轴之间的夹角。在光纤中传输的斜光线是一个具有螺旋状的空间曲线,在横截面上的投影为多条与焦散面相切的直线。在多模光纤中纤芯和包层之间折射率发生改变,光线在界面处发生反射,在传播过程中发生多次反射后在光纤截面的投影可以表示成环形区域。

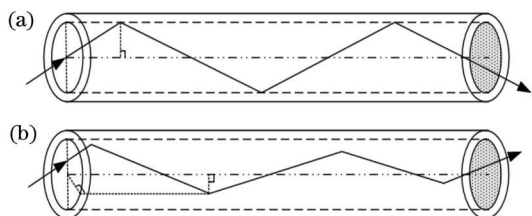


图1 光纤中(a)子午光线与(b)斜光线的传输路径

Fig.1 Transmission route of (a) meridional ray and (b) skew ray in fiber

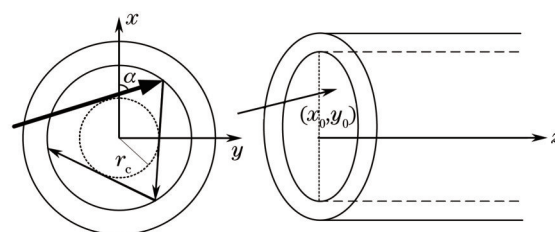


图2 入射光线在坐标系中的表示

Fig.2 Representation of incident ray in coordinate

当一光线的入射点发生偏移时,在光纤中改变的只是发生折射点的位置,并没有改变光线的折射角度,所以在光纤截面上的投影还是在同一个环形区域内。当光线扩展成具有一定尺寸的光束后,在光纤的出射面将形成环状光束发射出来。一束具有高斯分布的光束通过透镜耦合进入大芯径多模光纤(芯径一般在 $100 \mu\text{m}$ 以上),光束在光纤内传播会产生子午光线与斜光线,当激光的入射角度为零时,即光束以轴上方式入射,在光纤内传输的全部是子午光线,没有斜光线被激发,且焦散面半径为零,光纤内全部被光所填满,故出射光斑中心没有暗斑,即暗斑尺寸为零,产生的是一强度均匀的光斑,如图3(a)示。而当入射角度逐渐增大,斜光线逐渐被激发,入射光线在光纤波导中沿空间螺旋折线方向传播从而产生中心强度为零的空心光束。当入射点不同时空心光束的输出情况如图3(b)、(c)所示。

如图4所示,当具有相同入射角和焦散半径的光束入射到光纤,在光纤内经过多次反射,它们的出射线会分布在一个旋转双曲面内,双曲面的束腰半径数值上等于焦散半径 r_c ,双曲面的半孔径角数值上等于入射光线的倾角 θ 。双曲面可以表示为^[14]

$$\frac{x^2 + y^2}{r_c^2} - \frac{(z - z_c)^2}{r_c^2 / \tan^2 \theta} = 1, \quad (1)$$

其中 z_c 是束腰处 z 的坐标,是通过旋转双曲面轴向切线上顶点的 z 坐标值, z 轴原点位于出射端面上。 z_c 的最大值是光纤出射端面上出射点位于光纤芯径边缘处的出射光线对应的束腰的坐标值,

$$z_{\text{emax}} = \pm \frac{D/2}{\tan \theta} \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{D/2}\right)^2}, \quad (2)$$

其中 D 是光纤的纤芯大小。由(1)、(2)式可以看出,出射空心光束的参数与入射光束的角度和光纤的芯径有关。

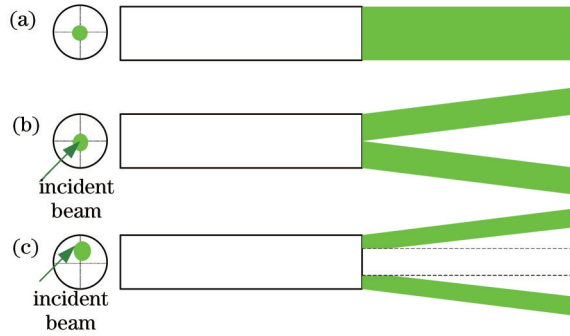


图3 不同位置处入射光束经过光纤后产生的空心光束。(a)垂直入射光纤端面中心;(b)斜入射光纤端面中心;(c)斜入射光纤端面任意位置

Fig.3 Output of hollow beam for different incident ray locations. (a) Vertical incidenting on the centre of optical fiber facing; (b) skew incidenting on the centre of optical fiber facing; (c) skew incidenting on any location of optical fiber facing

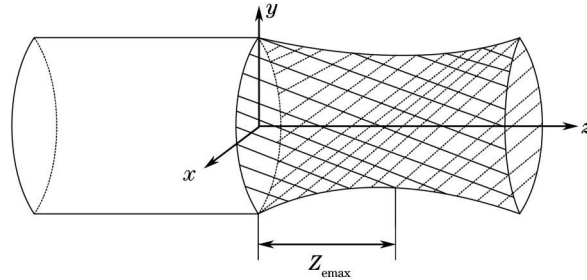


图4 光纤出射端处具有相同焦散半径的光线形成的旋转双曲面

Fig.4 Rotational hyperboloid formed by rays leaving the end face of the multimode fiber having the same caustic

3 模拟仿真

利用光学设计软件 Zemax 对光束经透镜聚焦后以一定角度耦合进大芯径多模光纤后产生空心光束进行建模仿真,如图 5 所示。这里,光源采用 LED 模型,经抛物面反光罩后成为平行光束,透镜 L_1 焦距为 100 mm,光纤纤芯折射率为 1.548,包层折射率为 1.462,光纤长度采用 200 mm,在光纤后 50 mm 处放置一薄透镜 L_2 ,焦距为 50 mm,探测透镜 L_2 后的光强分布。在光纤入射端面处设置断点,可使入射光束与光纤成一定角度。在透镜 L_2 后放置探测器,探测不同位置处光斑的截面光强分布如图 6 所示。

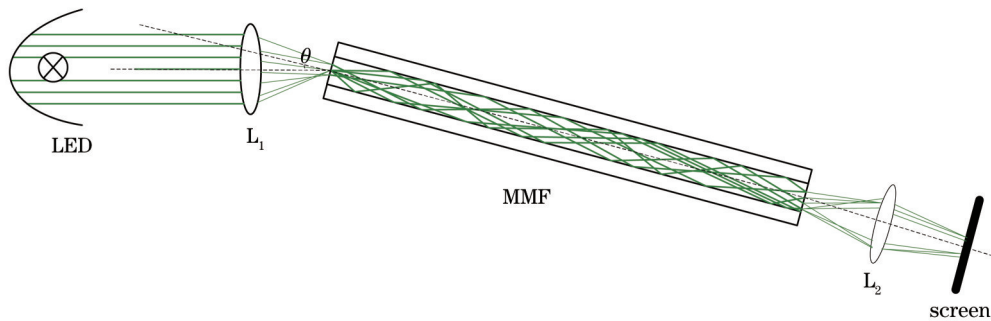


图5 用 Zemax 光学设计仿真软件建立仿真模型图

Fig.5 Simulation model diagram created by Zemax optical design simulation software

由图 6 可以看出,在距离透镜 37.5~47.5 cm 范围内有较清楚的空心光束产生,并且空心光束大小基本没有变化。

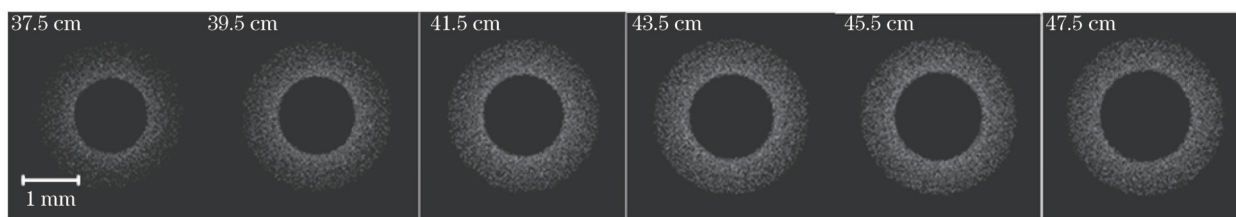


图6 模拟所得不同位置处截面光斑图

Fig.6 Cross section profiles at different positions in simulation

4 实验验证

LED作为光源,经透镜聚焦后耦合进大芯径多模光纤,图7为与仿真模型图5对应的实验装置图。

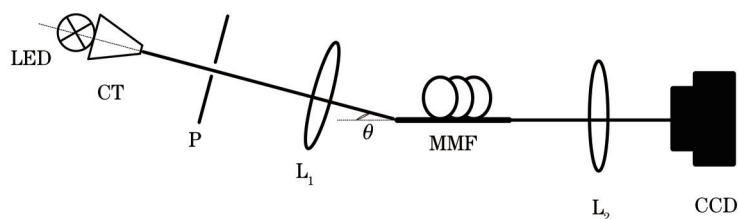


图7 利用LED作为光源产生空心光束的实验装置

Fig.7 Experimental setup of generating hollow beam by LED as source

实验中使用3 W的红色LED作为光源,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(CT),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P为直径 $d = 1.5 \text{ mm}$ 的光阑,聚光筒与光阑间距离 $D = 150 \text{ mm}$, L_1 、 L_2 分别是焦距为 $f_1 = 100 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 50 \text{ mm}$ 的凸透镜,光阑与透镜 L_1 之间的距离为 140 mm ,在实验中所使用的是纤芯直径为 $200 \mu\text{m}$ 的石英光纤,长度为 0.5 m ,光束以 10° 的倾斜角入射耦合进光纤,用CCD成像系统拍摄截面光强分布。

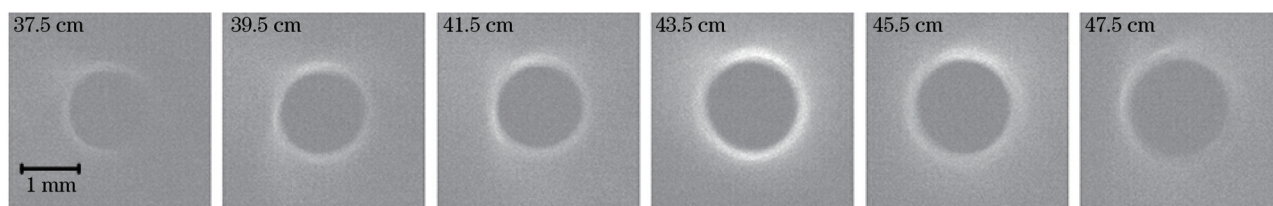


图8 实验所得空心光束不同位置处的截面光斑图

Fig.8 Cross section profiles of hollow beam at different positions in experiment

图8为实验拍摄透镜 L_2 后轴上空心光束不同位置处的截面光斑图,由图中可以看出,从距离透镜 $37.5 \sim 47.5 \text{ cm}$ 这 10 cm 范围内环状光束的直径基本保持不变,可见该空心光束在传输过程中的稳定性较好,与图6中模拟所得的结果基本吻合。由图8可以发现,所探测到的亮环是不对称的,这是由于当光束以一角度 θ 倾斜的入射进光纤后,光束在光纤内的传输是不对称的,所以从光纤出射端出射的光束光强具有不对称性。当用两束光束同时入射进光纤,一束以 θ 角度入射,另一束以 $-\theta$ 的角度入射,可以得到对称的亮环。

为了更好地理解利用LED光源获得空心光束的特性,采用同样的实验装置将光源换成激光光源(He-

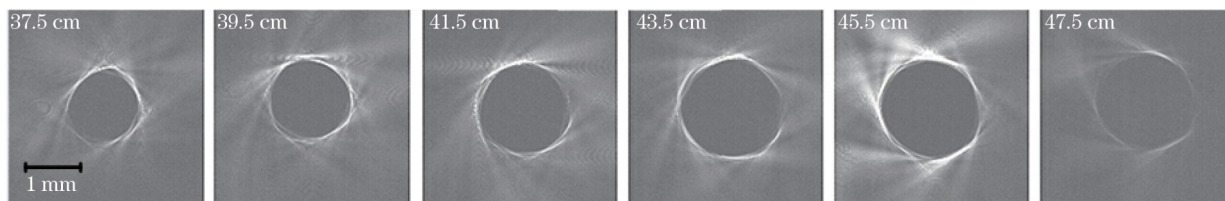


图9 激光作为光源产生的空心光束截面光斑图

Fig.9 Cross section profiles of hollow beam generated by laser as light source

Ne激光器),将拍摄的结果与LED作为光源进行对比,如图9所示。与图8比较可以看出,用LED获得的空心光束的均匀性更好。这是由于激光的相干性很强,光束通过光纤和透镜后产生干涉效应,所产生的光斑对比度较大。而LED光源是非相干光,几乎没有干涉效应,所以观测到的光斑辐照均匀性比较好。

5 结 论

采用几何光学的光线理论分析了光束入射到多模光纤后产生空心光束的传输特性,并且用Zemax光学设计软件对LED光源耦合进多模光纤进行建模仿真,探测了经透镜聚焦后的不同位置处的截面光强图,并且搭建实验装置。实验结果与仿真结果基本吻合,并且与激光作为光源进行对比,结果表明,利用非相干LED光源可获得空心光束,并且获得的空心光束的均匀性更好,扩展了LED的应用。

参 考 文 献

- 1 Liu Pusheng, Lü Baida. Phase singularities of the transverse field component of high numerical aperture dark-hollow Gaussian beams in the focal region [J]. Opt Commun, 2007, 272(1): 1-8.
- 2 V G Shvedov, C Hnatovsky, A V Rode, *et al.*. Robust trapping and manipulation of airborne particles with a bottle beam [J]. Opt Express, 2011, 19(18): 17350-17356.
- 3 J Hamazaki, R Morita, K Chujo, *et al.*. Optical-vortex laser ablation [J]. Opt Express, 2010, 18(3): 2144-2151.
- 4 K I Willig, S O Rizzoli, V Westphal, *et al.*. STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis [J]. Nature, 2006, 440(7086): 935-939.
- 5 L E Helseth. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems [J]. Opt Commun, 2001, 191(3-6): 161-172.
- 6 Du Tuanjie, Wang Tao, Wu Fengtie. Line focusing characteristics of axicon illuminated by non-diffracting Bessel beam [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134103.
杜团结, 王涛, 吴逢铁, 等. 干涉理论对聚焦无衍射光产生周期局域空心光束的描述 [J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134103.
- 7 Y Xia, J P Yin. Generation of focused hollow beam by an 2π -phase plate and its application in atom or molecule optics [J]. J Opt Soc Am B, 2005, 22(3): 529-536.
- 8 N R Heckenberg, R McDuff, C P Smith, *et al.*. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. Opt Lett, 1992, 17(3): 221-223.
- 9 H Y Ma, H D Cheng, W Z Zhang, *et al.*. Generation of a hollow laser beam by a multimode fiber [J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(8): 460-462.
- 10 Hu Xiaobo, Liu Shengnan, Gao Wei, *et al.*. Generation of a hollow laser beam by a liquid-core optical fiber [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105002.
胡晓博, 刘胜男, 高玮, 等. 利用液芯光纤产生空心光束 [J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105002.
- 11 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fan Dandan, *et al.*. Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source [J]. 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 [J]. 中国科学, 2012, 42(8): 805-811.
- 12 Fang Xiang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming. Effects of incoherent monochrome LED light source on the formation of Bessel beam [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0205001.
方翔, 吴逢铁, 程治明. 非相干单色LED光源对贝塞耳光束形成的影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0205001.
- 13 He Xi, Wu Fengtie, Li Pan, *et al.*. High order Bessel beams generated by using incoherent LED light source [J]. Sci Sin Phys Mech Astron, 2014, 44(7): 705-711.
何西, 吴逢铁, 李攀, 等. 非相干LED光源产生高阶Bessel光束 [J]. 中国科学, 2014, 44(7): 705-711.
- 14 G Schweiger, R Nett, B Ozel, *et al.*. Generation of hollow beams by spiral rays in multimode light guides [J]. Opt Express, 2008, 18(5): 4510-4517.

栏目编辑: 韩峰