

利用液芯光纤产生空心光束

胡晓博 刘胜男 高 玮 孙 颀 张洪英 张留洋

(哈尔滨理工大学光信息科学与技术系, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 提出了激光以一定角度入射液芯光纤(LCOF)产生空心光束(HLB)的方法。利用 Zemax 软件对产生系统建模,理论分析了 HLB 的暗斑尺寸 D_{ss} 和光束宽度随传播距离、LCOF 的长度与芯径的变化规律,并以 CS_2 作为芯液材料,用 630 nm 半导体激光器对部分理论结果进行了实验验证。研究表明,通过改变激光入射角度可获得 D_{ss} 可调的 HLB,其 D_{ss} 和光束宽度几乎不受 LCOF 长度的影响,但与芯径大小有关。该方法操作简便、成本低、 D_{ss} 调整范围大,可满足不同应用领域的需求。

关键词 光纤光学;空心光束;液芯光纤;暗斑尺寸

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1105002

Generation of a Hollow Laser Beam by a Liquid-Core Optical Fiber

Hu Xiaobo Liu Shengnan Gao Wei Sun Di Zhang Hongying Zhang Liuyang

(Department of Optics Information Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract A method of producing a hollow laser beam (HLB) by directing the laser beam at a certain angle into a liquid core optical fiber (LCOF) is presented. The dependences of dark spot size D_{ss} and beam width of the HLB on the propagation distance, and the length and core diameter of the LCOF are theoretically analyzed by modeling the generation system using Zemax. Using CS_2 as core-liquid material, a part of theoretical result is experimentally demonstrated with 630 nm semiconductor laser. The results show that HLBs with adjustable D_{ss} are obtained by changing the incident angle of the laser beam. D_{ss} and beam width of the HLB are independent of the LCOF length, while related to its core diameter. This method has advantages of convenient operation, low cost and wide adjustable range of D_{ss} . It can satisfy the needs of different applications.

Key words fiber optics; hollow laser beam; liquid-core optical fiber; dark spot size

OCIS codes 060.2310; 010.3310; 140.3300

1 引言

在传播方向上中心光强为零的环状光束称为空心光束(HLB),它具有传播不变性、桶状强度分布、暗斑尺寸小和无加热效应等新颖独特的物理性质,在微观粒子的冷却与囚禁、激光加工及生物医学等方面有着广泛的应用,其产生方法与特性目前仍是该领域的研究热点^[1~3]。以往常见的产生 HLB 的方法有横模选择法^[4]、几何光学法^[5]、模式变换法^[6]

和计算全息法^[7]等,这些方法的实验装置一般较为复杂。近年来提出了一些更为简便的方法,如空心光纤法^[8]、多模光纤法^[9]和选择性充液光子晶体光纤法^[1]等。空心光纤的耦合效率一般低于 50%,激光功率损耗较大。多模光纤法通过调节入射光束和光纤轴线之间的夹角来改变 HLB 的暗斑尺寸,但其入射光束夹角的变化范围很小,仅为 $\pm 2.78^\circ$,从而限制了 HLB 暗斑尺寸的变化范围。在光子晶体

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(61078004)和中国博士后基金(20100481017)资助课题。

作者简介: 胡晓博(1989—),女,硕士研究生,主要从事液芯光纤光学应用技术方面的研究。

E-mail: 15204608275@163.com

导师简介: 高 玮(1969—),女,博士,教授,主要从事非线性光纤光学与传感技术等方面的研究。

E-mail: wei_g@163.com

光纤的空气孔内选择性填充液体的技术难度大、成本较高。

液芯光纤(LCOF)是由充以高折射率液体的石英毛细管组成,相比普通石英光纤,其优点在于:1)数值孔径 NA 大,如 CS_2 液芯光纤的 NA 为 0.68 (接收角度约为 42.8°),而多模光纤一般在 0.3 左右;2)弯曲损耗小,液芯光纤的纤芯内部是可以自由流动的液体,当光纤弯曲时,内部产生的应力可以通过液体向周围释放,这样弯曲半径可以很大而没有大的损耗^[10];3)根据实际应用灵活选择芯液材料,液芯光纤的工作波长范围较宽。

针对以上现有产生 HLB 的方法中产生效率较低、数值孔径较小以及结构复杂等问题,本文提出了利用液芯光纤产生 HLB 的方法,该方法具有操作方便、装置简单、暗斑尺寸调节范围宽等优点。

2 理论研究

为了描述或比较各类不同的 HLB,定义暗斑尺寸 D_{ss} 为 HLB 凹口内侧径向强度分布的半峰全宽(FWHM);定义光束宽度 W_{HLB} 为 HLB 凹口外侧径向强度分布最大值的 $1/e^2$ 处的全宽度^[11]。

采用综合光学设计软件 Zemax 的非序列分析功能模块建立激光通过耦合透镜入射到液芯光纤产生 HLB 的模型,如图 1 所示。建模参数为:光源为高斯能量分布,波长为 630 nm;采用 10^7 条光线进

行追迹模拟;激光通过薄透镜聚焦耦合方式,薄透镜焦距为 50 mm;透镜与光纤端面的距离为 40 mm; NA 为 0.68;纤芯内层为 CS_2 液体,其折射率约为 1.62;外包层为石英玻璃,折射率为 1.46;入射激光和液芯光纤的夹角 θ 在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化;在距离光纤末端 20 mm 处接收输出光束。

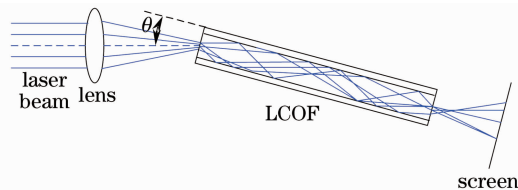


图 1 LCOF 产生 HLB 的仿真模型示意图
Fig. 1 Modeling schematic of generating a HLB by a LCOF

利用该模型计算了输出光斑随激光入射角度、传播距离、液芯光纤长度和芯径大小的变化。图 2 为不同入射角度下液芯光纤的输出光斑图,其中液芯光纤芯径为 $400 \mu m$,长度为 500 mm。图 2(g)为对应入射角度为 3° 时输出光斑的径向强度分布图。可见,HLB 径向为双高斯函数,环中心的强度为零。而且,HLB 的 D_{ss} 和 W_{HLB} 随着传播距离的增加而增大,如图 3 所示。因此,可选择合适的激光入射角度和传播距离,利用透镜组合对光束进行准直,可形成一定 D_{ss} 的平行 HLB 通道,这在微观粒子的操控等方面有应用价值。

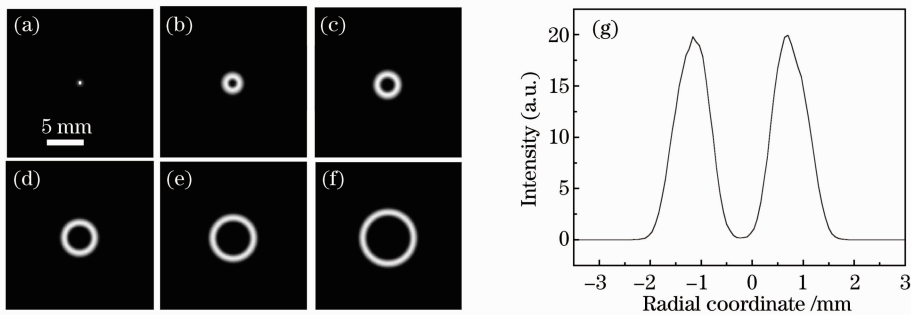


图 2 激光入射角为(a) 0° , (b) 3° , (c) 4° , (d) 6° , (e) 8° 和(f) 10° 时的输出光斑图以及(g)入射角为 3° 时的径向强度分布图

Fig. 2 Output beam patterns with input angles of (a) 0° , (b) 3° , (c) 4° , (d) 6° , (e) 8° , (f) 10° and (g) radial distribution of intensity with input angle of 3°

根据光纤传输的基本理论,在研究激光在多模光纤中传输时,可以把光纤内传输的光线分为子午光线和斜光线。通过光纤中心轴的任何平面都称之为子午面,位于子午面内的光线称之为子午光线,不在子午面内的光线则定义为斜光线。子午光线传播的特点为其入射光线、反射光线及分界面的法线三

者均在子午面内,斜光线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。激光注入的角度不同直接影响着液芯光纤内传输光线的传播方向与分布,从而影响输出光束的特性。图 4 为 3 种角度下 Zemax 仿真过程的截图,为清楚起见,取 LCOF 长度为 150 mm,芯径为 2 mm。当激光的入

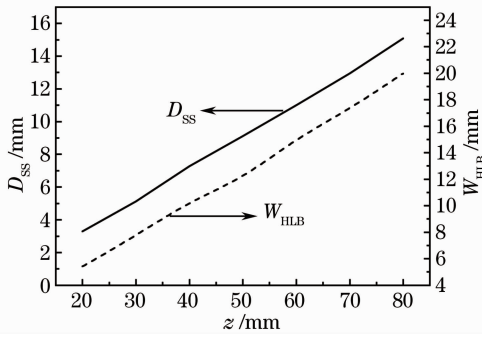


图3 D_{SS} 和 W_{HLB} 随 HLB 中传播距离 z 的变化关系
Fig. 3 D_{SS} and W_{HLB} versus HLB's propagation distance z

射角度为 0° 时,透镜会聚后的光斑在光纤中心轴上,所以在光纤内传输的全部是子午光线[图 4(a)],且基本沿着光纤轴线传播,形成一强度均匀的光斑,如图 2(a)所示;当入射角度增大时,透镜会聚后的光斑偏离光纤中心轴,存在横向偏移,如图 4(d)所示,这时斜光线被激发,产生中心强度为零的 HLB,且随着角度的增加,光纤内各种光线的传播方向发生改变、偏折加重,输出光线分开的角度变大,如图 4(b),(c)所示,所以 HLB 的 D_{SS} 也随之增大。而且,当接收屏与光纤输出端面距离增大时,HLB 的 D_{SS} 也变大。

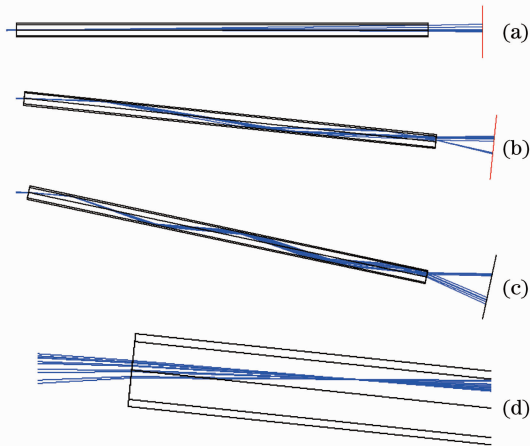


图4 激光入射角为(a) 0° , (b) 6° , (c) 12° 时的 Zemax 仿真过程的截图和(d)激光入射角为 6° 时的光纤前端放大图

Fig. 4 Screenshot of Zemax simulation process with input angle of (a) 0° , (b) 6° , (c) 12° and (d) zoomed view of fiber front with input angle of 6°

图5为 HLB 的 D_{SS} 和 W_{HLB} 随液芯光纤长度的变化关系,此时激光的入射角度为 6° ,液芯光纤内径为 $200 \mu\text{m}$,可以看出,随着长度的增加 HLB 的 D_{SS} 和 W_{HLB} 都几乎没有变化。

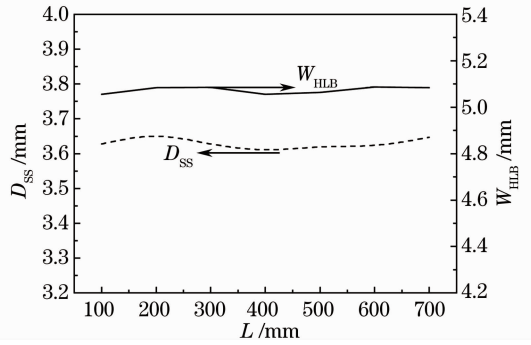


图5 D_{SS} 和 W_{HLB} 随 LCOF 长度的变化关系
Fig. 5 D_{SS} and W_{HLB} versus length of LCOF

激光入射角为 3° ,LCOF 的长度为 200 mm 时,改变其芯径,HLB 的各参数也随之改变。输出的 HLB 各参数随芯径的变化如图 6 所示。可见, D_{SS} 随着液芯光纤芯径的增加而减小, W_{HLB} 变宽。因此,液芯光纤芯径的大小也影响光纤内光线的传播。

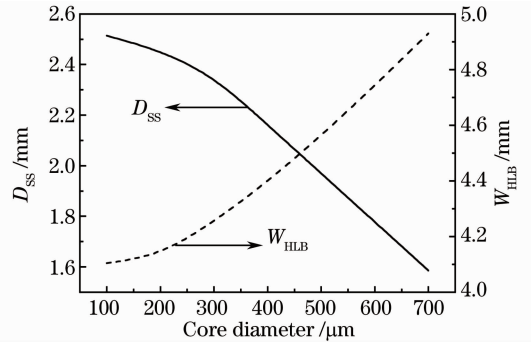


图6 D_{SS} 和 W_{HLB} 随 LCOF 芯径的变化关系

Fig. 6 D_{SS} and W_{HLB} versus core diameter of LCOF

3 实验研究

实验装置结构和图 1 所示的仿真模型类似。实验用波长为 630 nm 的半导体激光器作光源,焦距为 5 cm 的透镜将光束会聚到芯径为 $400 \mu\text{m}$ 、外径为 $600 \mu\text{m}$ 、长度为 100 cm 的 CS_2 液芯光纤中,在距离出射端 6 mm 处用电荷耦合器件(CCD)采集输出光斑,通过调节衰减片来控制入射到 CCD 里的光强。 CS_2 液芯光纤采用类似文献[12]的耦合头封装,端面为 1 mm 厚的石英片,根据光的折射定律,石英片对仿真模型的计算结果影响不大。

输出光斑的空间分布图像如图 7 所示。实验中,调整入射光束使它与液芯光纤共轴,此时它们的夹角为 0° ,出射图像是一个实心光斑,如图 7(a)所示。在入射角由 0° 缓慢增加的过程中,可以得到一系列不同大小的环,如图 7(b)~(f)所示。由于 CCD 的接收面积有限,实验中没有采集到所有角度

的环,不过通过白屏,观察到了 $0^\circ\sim 20^\circ$ 内空心环的变化情况,超过 20° 后,即超出了液芯光纤数值孔径对应的接收半角,没有HLB输出。图7(g)中的虚线图是对应 3° 入射角的光斑径向强度分布图,为中心强度接近于零的HLB,和理论计算基本符合。可

以看出,实验测得的HLB的质量一般,这可以通过降低激光光源的相干性或采用部分相干光源来加以改善^[13],其特性随着液芯光纤长度、芯径的变化趋势和文献[14]中多模光纤的实验结果类似。

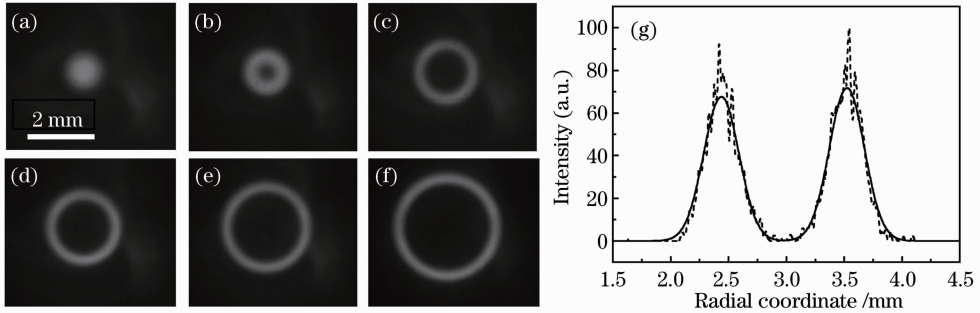


图7 入射角为(a) 0° , (b) 3° , (c) 7° , (d) 9° , (e) 12° 和(f) 14° 时的出射光束空间近场图像和 (g)入射角为 3° 时的径向强度分布图

Fig. 7 Near field patterns of output beams with input angles of (a) 0° , (b) 3° , (c) 7° , (d) 9° , (e) 12° , (f) 14° and (g) radial distribution of intensity with input angle of 3°

4 结 论

采用Zemax软件建立了液芯光纤产生HLB的模型,仿真分析了激光入射角度、液芯光纤长度、芯径以及传播距离对HLB的 D_{SS} 和 W_{HLB} 的影响,并进行了实验研究。结果表明,随着激光入射角度的增加,HLB的 D_{SS} 也随之增加;LCOF的长度对 D_{SS} 和 W_{HLB} 几乎没有影响;当LCOF的芯径增加时, W_{HLB} 随之增加而 D_{SS} 却减小; D_{SS} 和 W_{HLB} 均随着HLB中传播距离的增加而增加。因此,通过改变激光入射角度、LCOF的结构参数以及传播距离,可以调整HLB特性,满足捕获和操控微粒、激光加工等不同应用领域的需求。

参 考 文 献

- 1 Zhang Meiyang, Li Shuguang, Yao Yanyan *et al.*. A dark hollow beam from a selectively liquid-filled photonic crystal fibre[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(4): 047103
- 2 Sun Qionggong, Zhou Keya, Fang Guangyu *et al.*. Hollow sinh-Gaussian beams and their paraxial properties[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(9): 9682~9691
- 3 Chen Ziyang, Zhao Daomu. 4Pi focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(8): 1286~1288
- 4 X. Wang, M. G. Littman. Hollow Gaussian Schell-model beam and its propagation[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 767~768
- 5 H. Ito, K. Sakaki, W. Jhe *et al.*. Atomic funnel with evanescent light[J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **56**(1): 712~718
- 6 W. L. Power, L. Allen, M. Babiker *et al.*. Atomic motion in

- light beams possessing orbital angular momentum[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(1): 479~488
- 7 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
- 8 Yin Jianping, Noh Heung Ryoul, Lee Kwan *et al.*. Generation of a dark hollow beam by a small hollow fiber[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **138**(4-6): 287~292
- 9 Ma Hongyu, Cheng Huadong, Zhang Wenzhuo *et al.*. Generation of a hollow laser beam by a multimode fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 460~462
- 10 Jia Huawen, Yin Zhidong, Shi Xiaohong. The development of liquid core optical fiber[J]. *Fiber Glass*, 1999, (3): 43~45
- 贾华文, 殷志东, 施晓红. 液芯光纤的研制[J]. *玻璃纤维*, 1999, (3): 43~45
- 11 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics[J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3): 336~380
- 印建平, 刘南春, 夏勇等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3): 336~380
- 12 Xu Yonghao. Theoretical and Experimental Study on Sub-Wavelength Silica Fiber and Liquid-Core Fiber and Their Potential Use[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. 75~76
- 许永豪. 亚波长直径氧化硅光纤和液芯光纤理论分析、实验制备和应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. 75~76
- 13 Zhao Chengliang, Cai Yangjian, Wang Fei *et al.*. Generation of high-quality partially coherent dark hollow beam with a multimode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1389~1391
- 14 Zhao Chengliang. The Study of Laser Beam and Radiation Force on Particles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 61~91
- 赵承良. 激光光束及其对微粒辐射力的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 61~91