

文章编号: 1000-5013(2011)05-0498-04

一种空心光束的简易实现方法

陈光明<sup>1,2</sup>, 林惠川<sup>1</sup>, 蒲继雄<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021;  
2. 福建教育学院, 福建 福州 350025)

**摘要:** 利用玻璃毛细管作为空心波导,研究聚焦光束在其中的传输特性. 实验结果表明:当聚焦光束以正射方式入射到空心玻璃毛细管波导时,经玻璃毛细管传输后的聚焦光束由原先的高斯光束变成零阶贝塞耳光束;而当聚焦光束非正射入射时,即聚焦光束以其光轴与毛细管中心细孔的中心轴成某一角度入射时,经传输后的聚焦光束由原先的高斯光强分布变为空心光强分布. 此外,不同长度的毛细管及不同的入射角,都会对所产生的空心光束的黑斑尺寸和发散角产生影响.

**关键词:** 激光; 玻璃毛细管; 空心光束; 暗斑

**中图分类号:** O 436 **文献标志码:** A

随着激光技术的发展及激光的广泛应用,一般高斯型光强分布的激光已经不再满足人们的应用需求. 随着各类空心光束的相继出现,空心光束的产生和应用已经引起了人们越来越多的关注. 空心光束是一种在传播方向上中心光强或轴向光强为零的光束,其作为激光导管<sup>[1]</sup>、光学镊子(光钳)<sup>[2]</sup>和光学扳手<sup>[3-4]</sup>已成为实现微观粒子精确操纵和控制的有力工具<sup>[5]</sup>,因此在实验上产生空心光束是很有意义的工作. 近年来,国内外的研究者采用各种方法获得了一系列新颖的空心光束,如几何光学法、横模选择法、模式变换法、光学全息法、计算机全息法、空心光纤法和  $\pi$  位相片法等方法都可以产生空心光束<sup>[6]</sup>. 但这些方法无论是实现难度上,还是对光学仪器的要求上都有较高要求. 考虑到实现的难易情况及操作的可行性,本文提出一种结构简单、器件加工容易、易于调整的空心光束的简易实现方法,并对影响产生空心光束的系统参数进行研究<sup>[7]</sup>.

1 实验装置

用玻璃毛细管实现空心光束的简易实验光路,如图 1 所示. 图 1 中: $f$  为透镜的焦距; $\theta$  为聚焦光束的光轴与毛细管纵向轴方向的夹角; $l$  为毛细管的长度; $Z$  为毛细管出光口到 CCD 的距离.

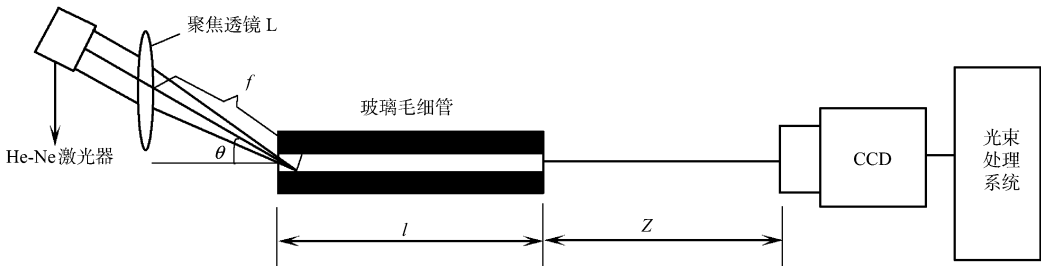


图 1 产生空心光束的实验装置  
Fig. 1 Experimental device to generate the hollow beam

**收稿日期:** 2011-03-11

**通信作者:** 陈光明(1955-),男,副教授,主要从事基础光学、非线性光学研究. E-mail: cccgm@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60977068);中国科学院瞬态光学与光子技术国家重点实验室基金资助项目(SKL-ST200912)

实验中所采用的光源为光束质量较好的 He-Ne 激光器,光从激光器输出后经透镜聚焦耦合到玻璃毛细管中,聚焦光束的焦点落在毛细管中.通过改变激光器与透镜的位置来改变光束光轴与毛细管轴的夹角,其中应注意的是始终保持透镜的焦点落在毛细管中,以保证聚焦光束能全部耦合到毛细管中.毛细管长度  $l$  可通过改变不同的毛细管来实现其长度的变化,把 CCD 放在不同的位置上可改变  $Z$  的长度,从而可对所获得的光束的传输特性进行研究.在实验中主要考虑夹角  $\theta$ 、长度  $l$  对得到的光束的影响,通过改变不同的  $Z$  对得到光束的传输特性进行研究.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 夹角对传输后光斑的影响

当把聚焦光束正射耦合到玻璃毛细管中,即  $\theta$  等于零,经毛细管传输后可得到零阶贝塞尔光<sup>[8]</sup>.然而,当耦合角度  $\theta$  不为零时,即非正射情况下聚焦光束经毛细管传输后可得什么样的光斑并没有相应的报道.在非正射的情况下,当透镜焦距  $f$  为 5 cm,毛细管长  $l$  为 9.5 cm,屏幕与玻璃毛细管端面之间的距离  $Z$  为 10 cm 时,不同角度  $\theta$  的耦合光束经毛细管传输后得到的光斑,如图 2 所示.

从图 2(a)的光强分布可知,正射条件下耦合光束经毛细管传输得到的是贝塞尔光束,而这与先前的报道相符合.在图 2(b),(c),(d)中,会聚透镜与玻璃毛细管端面之间的距离  $d=f$ ,调整聚焦光束的中心与毛细管中心细孔的中心轴成的角度,使之逐渐增大,出射光束为空心的圆光束.实验结果说明,随着聚焦光束的中心与毛细管中心细孔的中心轴间角度的增大,空心光束的发散角在增大.

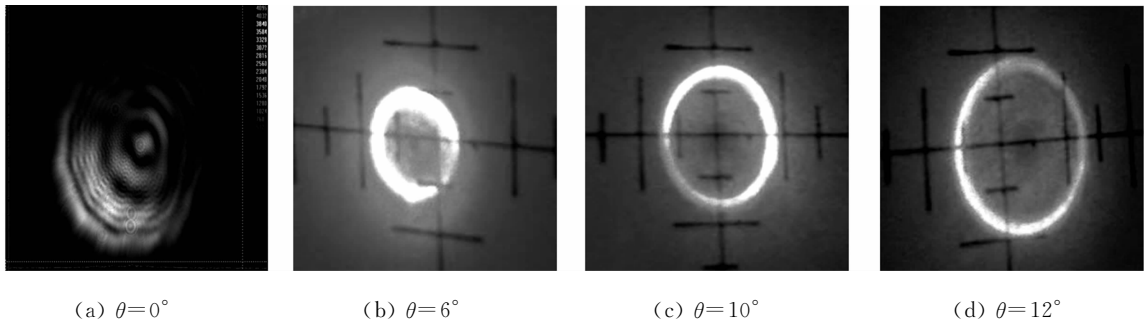


图 2 不同角度下聚焦光束经毛细管传输后所得到的光斑

Fig. 2 Spots pattern of the focused beam propagating through the glass capillary in different incident angle

### 2.2 毛细管长度和会聚透镜焦距对传输后光斑的影响

取不同的玻璃毛细管长度  $l$ 、会聚透镜的焦距  $f$ ,会聚透镜与玻璃毛细管端面之间的距离  $d=f$ ,调整聚焦光束的中心与毛细管中心细孔的中心轴成某一角度时,出射光束为空心的圆光束.实验中,用数码相机记录下了空心光束在传播方向上暗斑尺寸的演变过程,结果分别如图 3~6 所示.

从图 3 可以看出,随着屏幕与玻璃毛细管端面之间的距离  $Z$  的变大,空心光束在传播中产生扩散,暗斑尺寸在变大.

从图 4 可以看出,随着屏幕与玻璃毛细管端面之间的距离  $Z$  的变大,空心光束在传播中产生扩散,暗斑尺寸在变大.但相对于图 3 的情况,图 4 的发散角相对较小.

从图 5 可以看出,随着屏幕与玻璃毛细管端面之间的距离  $Z$  的变大,空心光束在传播中产生扩散,

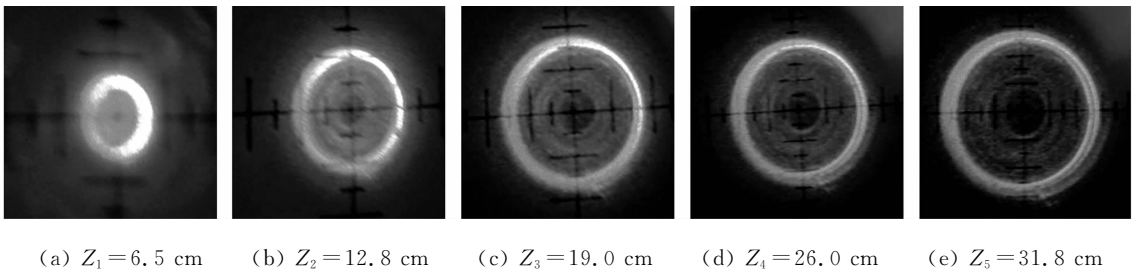
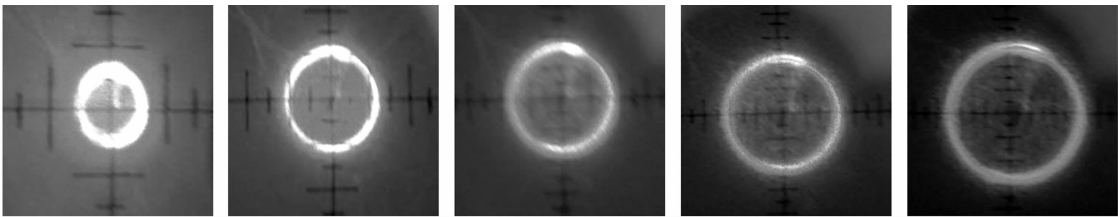


图 3 不同距离下得到的空心光束的光强分布( $l=16.6$  cm,  $f=5$  cm)

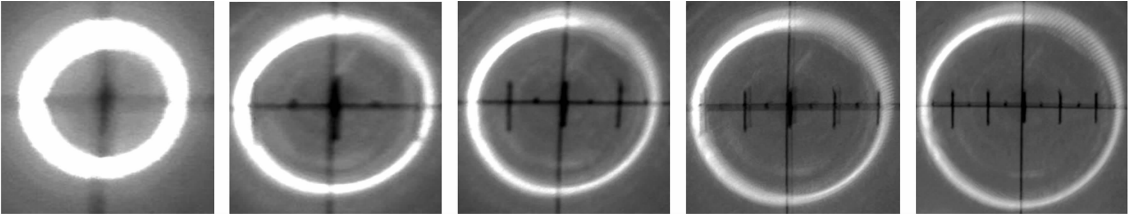
Fig. 3 Intensity distribution of hollow beam in different location ( $l=16.6$  cm,  $f=5$  cm)



(a)  $Z_1=7.5\text{ cm}$     (b)  $Z_2=15.9\text{ cm}$     (c)  $Z_3=24.5\text{ cm}$     (d)  $Z_4=32.8\text{ cm}$     (e)  $Z_5=41.5\text{ cm}$

图 4 不同距离下得到的空心光束的光强分布( $l=13.5\text{ cm}$ ,  $f=5\text{ cm}$ )

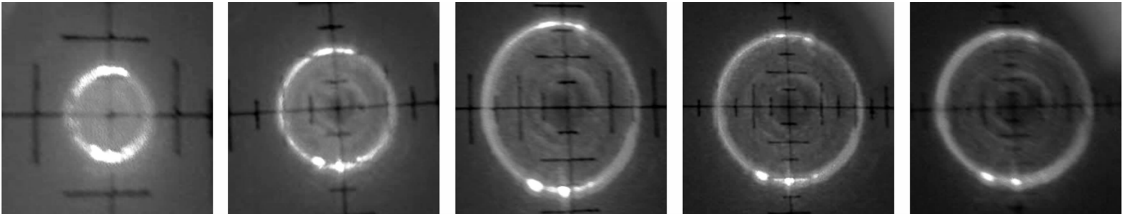
Fig. 4 Intensity distribution of hollow beam in different location ( $l=13.5\text{ cm}$ ,  $f=5\text{ cm}$ )



(a)  $Z_1=10.2\text{ cm}$     (b)  $Z_2=21.5\text{ cm}$     (c)  $Z_3=31.5\text{ cm}$     (d)  $Z_4=40.6\text{ cm}$     (e)  $Z_5=52.0\text{ cm}$

图 5 不同距离下得到的空心光束的光强分布( $l=13.5\text{ cm}$ ,  $f=20\text{ cm}$ )

Fig. 5 Intensity distribution of hollow beam in different location ( $l=13.5\text{ cm}$ ,  $f=20\text{ cm}$ )



(a)  $Z_1=6.5\text{ cm}$     (b)  $Z_2=13.0\text{ cm}$     (c)  $Z_3=19.8\text{ cm}$     (d)  $Z_4=25.8\text{ cm}$     (e)  $Z_5=32.5\text{ cm}$

图 6 不同距离下得到的空心光束的光强分布( $l=9.5\text{ cm}$ ,  $f=5\text{ cm}$ )

Fig. 6 Intensity distribution of hollow beam in different location ( $l=9.5\text{ cm}$ ,  $f=5\text{ cm}$ )

暗斑尺寸在变大. 相对于图 4 的情况, 图 5 的发散角相对增大.

从图 6 可以看出, 随着屏幕与玻璃毛细管端面之间的距离  $Z$  的变大, 空心光束在传播中产生扩散, 暗斑尺寸也在变大.

2.3 空心光束经传输后的发散情况

为了进一步说明玻璃毛细管长度、会聚透镜焦距不同时, 空心光束在光束传播方向上发散的情况, 利用实验数据作毛细管长度和会聚透镜焦距不同时产生的空心光束的扩散比较, 如图 7 所示. 从图 7 可知: 会聚透镜焦距相同, 玻璃毛细管长度不同时, 其出射的空心光束会发生发散; 玻璃毛细管长度相同, 会聚透镜焦距不同时, 在光束传播的方向上, 会聚透镜焦距长的, 其空心光束的发散角比会聚透镜焦距短的发散角大.

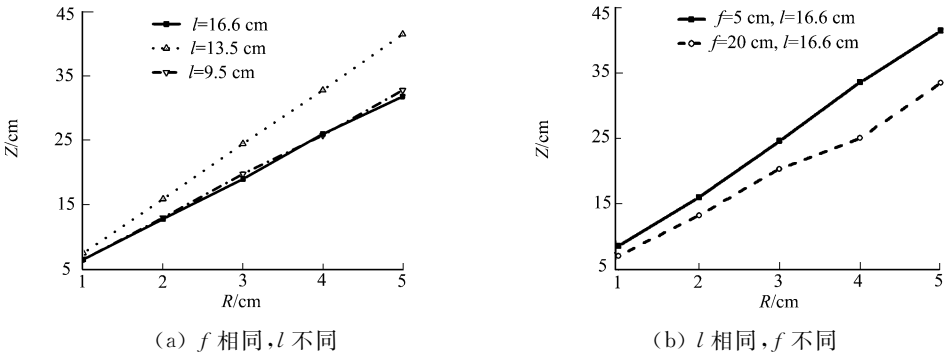


图 7 空心光束在光束传播方向上发散比较

Fig. 7 Divergence of the hollow beam in propagation for different experimental parameters

3 结束语

文中提出了用容易调节的玻璃毛细管产生空心光束的实现方法. 当聚焦光束的中心与毛细管中心细孔的中心轴成某一角度时, 通过观察发现, 出射光束为空心的圆光束, 并且沿光束传播方向光强分布不发生改变, 仅产生扩散; 随着聚焦光束的中心与毛细管中心细孔的中心轴间角度的增大, 空心光束的发散角在增大; 会聚透镜焦距相同, 随着玻璃毛细管长度的变化, 出射空心光束的扩散情况发生变化; 玻璃毛细管长度相同, 会聚透镜的焦距不同, 会聚透镜焦距长的, 其空心光束的发散角比会聚透镜焦距短的发散角大.

参考文献:

[1] TATARKOVA S A, SIBBETT W, DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(038101): 1-4.

[2] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVIL LE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, 419: 145-147.

[3] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle [J]. *Science*, 2001, 292: 912-914.

[4] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. *Science*, 2002, 296: 1101-1103.

[5] GRIER D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424: 810-816.

[6] 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.

[7] SCHWEIGER G, NETT R, ÖZEL B, et al. Generation of hollow beams by spiral rays in multimode light guides [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4510-4517.

[8] 廖坤山, 董梅梅, 蒲继雄. 贝塞尔光束的简易实现方法 [J]. *华侨大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(4): 356-359.

A Simple Way for Generating Hollow Beams

CHEN Guang-ming<sup>1,2</sup>, LIN Hui-chuan<sup>1</sup>, PU Ji-xiong<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
2. College of Fujian Education, Fuzhou 350025, China)

**Abstract:** Using a glass capillary as hollow waveguide, the propagation property of the focused beam passing through it was studied. By the experimental investigation, we find that when the optical axial of the focused beam is parallel to the glass capillary, the intensity distribution of the focused beam is change from Gauss type to zeroth-order Bessel type. However, if the optical axial is not parallel to the glass capillary, namely a angle between optical axial of focused beam and glass capillary exist the focused beam change into a hollow beam. Moreover we experimentally investigate the influence the length of the glass capillary and the angle between optical axial of focused beam and glass capillary on the parameters of the generated hollow beam, including the size and the divergence of the hollow beam.

**Keywords:** laser; glass capillary; hollow beam; dark spot

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 吴逢铁)