

文章编号: 0258-7025(2004)10-1261-05

# 空芯光纤输出能量分布及其应用的研究

堵久辉<sup>1,2</sup>, 侯蓝田<sup>1</sup>, 李绍胜<sup>2</sup>, 杨义<sup>1</sup>, 周桂耀<sup>1</sup>, 侯峙云<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004; <sup>2</sup> 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

**摘要** 空芯光纤纤芯内场强分布一直是研究热点,在某些限定条件下可通过光纤输出能量分布近似。提出了一种空芯传能光纤输出能量分布的简便测量方法,通过试验测量结果分析了输出能量分布在光纤模式纯度估算和光纤耦合状态检测两方面的应用,最后通过实验讨论了输出光束腰问题,对不同全内反射(ATR)空芯光纤所得结果进行了比较。

**关键词** 导波光学;空芯光纤;能量分布;模式纯度;耦合

**中图分类号** TN 252 **文献标识码** A

## Theories and Applications on Output Energy Distribution of Hollow Fiber

DU Jiu-hui<sup>1,2</sup>, HOU Lan-tian<sup>1</sup>, LI Shao-sheng<sup>2</sup>,  
YANG Yi<sup>1</sup>, ZHOU Gui-yao<sup>1</sup>, HOU Zhi-yun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> IR Fiber and Sensor Institute of Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)  
(<sup>2</sup> School of Telecom Engineering, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)

**Abstract** The electromagnetic distribution in hollow fiber always is one of key research points of hollow waveguide. Under certain hypotheses, the energy distribution of output laser passed through hollow waveguide seems to reflect the electromagnetic distribution in hollow fiber, but the conventional measurement approaches are much complex and the device is too expensive. A simple and effective method for measuring the energy distribution and its applications on mode purity analysis and coupling status detection of hollow waveguide are introduced in this paper. Finally, the output beam waist problem for a beam passing through a hollow fiber is discussed and the output beam focus of different hollow fibers is measured.

**Key words** guided wave optics; hollow fiber; energy distribution; mode purity; coupling

## 1 引言

随着激光及其相关技术的发展,工作频率位于红外区的多种激光器已广泛应用于通信工程<sup>[1]</sup>、工业加工<sup>[2]</sup>、军事技术、医疗卫生<sup>[3,4]</sup>等多种领域,在国民经济建设中发挥着重要作用。传统的传输激光设备主要有导光臂,它由数量众多的小反射镜组成,设计复杂且调节困难。传能光纤尤其是空芯传能光纤(简称空芯光纤)的出现有效地解决了这一问题。空芯光纤具有结构简单、易弯曲、无端口损耗、性能价格比高等优点,同时在传输激光时将激光束缚在光

纤内,具有很好的安全性;其设计的主要难点在于介质膜材料组成<sup>[5]</sup>以及介质膜厚度等参数的选取上。空芯光纤已逐渐成为最重要的光传输装置,具有良好的发展前景。

本文主要针对用于传输近红外和中红外波段大功率激光能量的空芯光纤的输出能量分布及几个关键特性进行测量,进而对实验结果进行分析。

## 2 光纤输出激光的能量分布

空芯光纤属于光波导,它的基本问题都应运用

收稿日期:2003-06-09;收到修改稿日期:2003-10-08

作者简介:堵久辉(1977—),男,河北唐山人,北京邮电大学电信工程学院信号处理专业博士研究生,主要从事个人通信、3G系统网络层以及智能天线的研究。E-mail:raindoo@tom.com

导波光学的理论进行求解。理论计算得到的电磁场分布是否与光纤内实际存在的电磁场模式一致,需要对光纤芯区的场强分布(也称能量分布)进行测量。然而电磁场模式存在于光纤内部,不可能直接对其测量,需要通过测量光纤输出能量分布来间接测量纤芯内场强分布。假设空气等外界因素在短距离内对导波模式传输没有影响,就可以把光纤输出能量分布视为光纤内模式分布的等比放大。可见,输出能量分布的研究是空芯光纤理论研究的基础。

对空芯光纤输出能量分布的精确定量测量,可以通过由热敏传感器等组成的检测系统来实现,但测量周期长,设备复杂且价格昂贵。当对能量分布的测量精度要求不高或者仅对能量分布进行定性模式分析时,可采用一种简便的测量方法:将测试纸放在距离光纤出口的适当位置上,经短时间激光照射,测试纸上将显现出激光能量分布,再经计算机处理去除环境噪声等扰动因素。该方法与照相底片曝光的原理类似,因此称之为直接曝光法。此种方法具有测量简单,时间短,成本低,测量结果包含信息量大等优点。但需要注意以下几点:

1) 测试纸的位置:既不能距离光纤出口端太近(高强度激光会在短时间内把测试纸烧穿,导致图像的平顶现象);也不能太远(激光能量不足以在测试纸上呈现清晰图像)。该位置的确定与激光器的标称功率、光纤的直线型损耗以及测试纸自身特性等有关。

2) 对测试纸的要求:既要热敏感,又不能导热太快,推荐使用对辐射响应较好的打印纸。

3) 应用测试纸直接曝光法时还需要解决激光照射时间、光斑灰度和输入激光功率三者之间的线性对应关系。

针对上述方法得到的光斑还需经过扫描、计算机上滤波去噪、转化成灰度位图、显示等处理过程。图1为 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤<sup>[6,7]</sup>得到的光斑及处理结果。该光纤属于衰减全内反射(ATR)型空芯光纤,其基质为电介质,涂层为金属,具有一定的代表性。试验光纤长 2.76 m, Ge 膜厚度为 5 μm。(a)为扫描测试纸中图像所得到的光斑,(b)为经过 Photoshop 程序 6 次去斑滤波后转成 256 级灰度的结果,(c), (d)为 Matlab 处理后的二维能量等高线和三维能量分布结果。

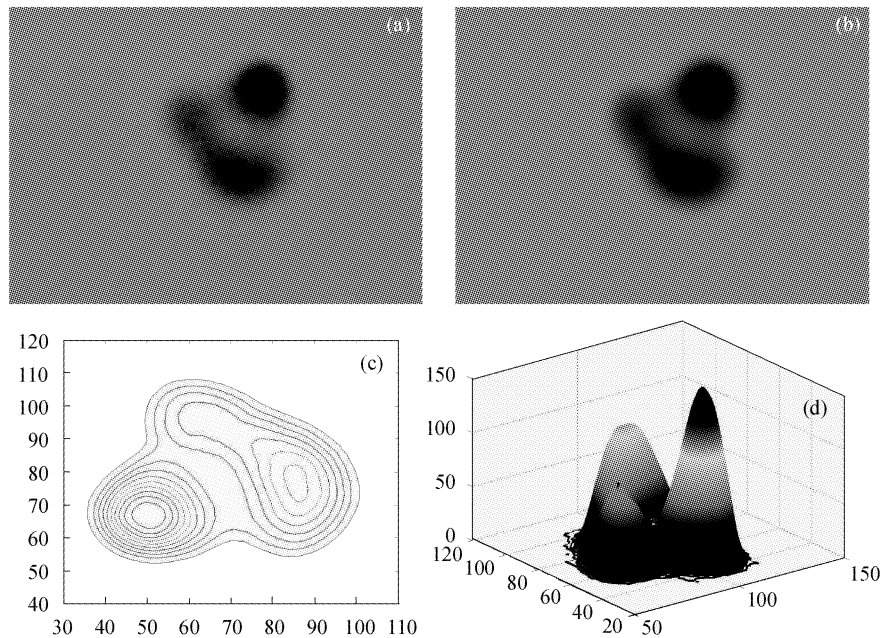


图1 用测试纸直接曝光法得到的光斑和处理后结果

Fig. 1 Facula and the processed outcome by testing paper directly exposing method

### 3 能量分布的应用

通过测量空芯光纤输出能量分布的方法间接得到光纤芯区的电磁场分布,这是进一步理论分析的

基础,所以输出能量分布在空芯光纤的理论研究及实际应用中都具有重要意义。下面从光纤内模式纯度和耦合状态检测两个方面来说明能量分布的应用。

### 3.1 光纤内模式纯度的计算

对于金属或电介质涂层空芯光纤,激光束在纤芯内传输时,理想结果是芯区只有最小损耗模(也称主导传输模)存在,高阶模将在光纤前端迅速衰减掉。然而在一些如尖锐弯曲(sharply bend)等条件下,光纤内存在多个模式,此时可通过模式纯度来评价光纤的传输特性。模式纯度定义为光纤内传输模式中最低损耗模式所占的比例,模式纯度越高说明光纤的传输特性越好。可通过测量光纤输出能量分布对光纤内模式纯度进行估算。

图2为 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤(长为 1.2 m)的不同状态能量分布。(a)为激光器输出能量分布(呈现高斯型分布),模式纯度为 100%;(b)芯径为 0.8 mm 时,光纤在直线状态下所得输出能量分布,可见(b)中模式分布与(a)中模式分布基本上保持了一致,模式纯度非常高;(c)为光纤在尖锐弯曲(弯曲半径为 10 cm,光纤弯曲 2 个圆周)下输出能量分布。可见(c)中模式分布有低幅值的高阶模式出现,因此模式纯度较低。通过计算主导传输模曲面下体积与总体积之比即可对当前状态的传输模式纯度进行估算。

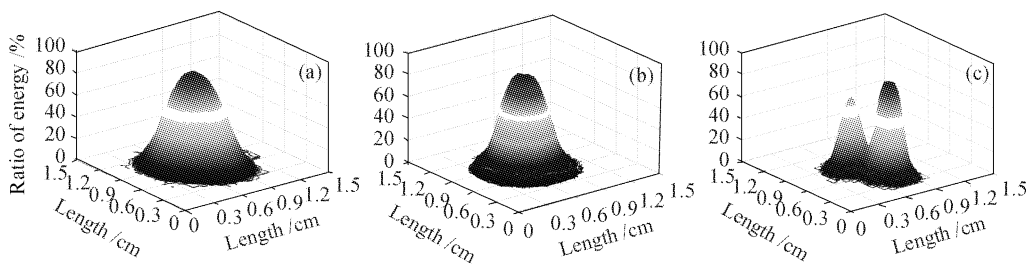


图2 能量分布显示的不同模式纯度

Fig. 2 Different mode purity are displayed by energy distribution

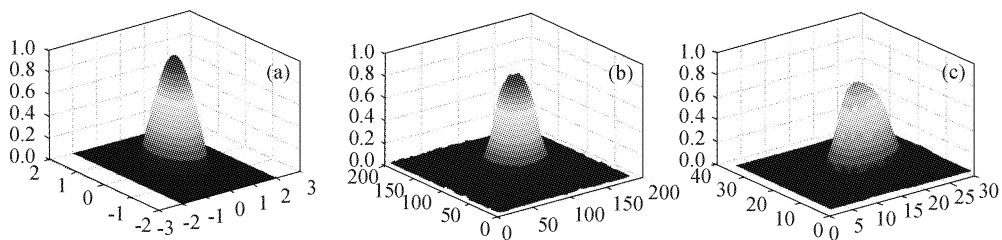


图3 标准高斯能量分布与出射光的能量分布

Fig. 3 Standard Gauss distribution and the measured energy distribution of output light

### 3.2 不同耦合状态下光纤输出光的能量分布

由于结构和应用上的特殊性,空芯光纤的应用要保证绝大部分能量耦合进光纤并进行无耗传输。这使得空芯光纤耦合输入角不同于通信光纤中数值孔径的概念。当输出阈值给定后,可测量激光对空芯光纤耦合的最大入射角(或称为临界入射角)。该值与光纤管壁及涂层的材料特性、芯径、长度等有关。小于耦合临界角的耦合被称为良好耦合,而大于耦合临界角的耦合被称为不良耦合。

耦合状态的检测是重要的。但在一些应用场合,为提高系统稳定性,激光器和耦合部分被固定封装在一密闭箱内,这就给耦合状态测量带来不便,因为打开密闭箱将会对系统稳定性造成很大影响。

通过能量分布可以简易、可靠地实现从输出端对耦合状态的检验,因为不同耦合条件下的光纤输

出能量分布具有明显差异。因此可通过测量输出能量分布并与最佳耦合(光束 0 角度入射光纤)的能量分布相比较,得出当前的耦合状态。

图3(a)为高斯公式计算得到的标准能量分布图的中心部分;(b)为良好耦合条件下的能量分布;(c)为不良耦合条件下的能量分布。可见不良耦合条件下,输出能量峰值减小且能量分布底面产生扩散。空芯光纤产生这种能量衰减现象的主要原因有两个:

1) Ge/GeO<sub>2</sub> 膜是一种吸收全反射材料,入射角和光线在光纤内壁的反射次数相联系,入射角增大,反射次数增多,吸收加强,造成输出能量衰减;

2) 高强度激光会使膜层变热,热度改变膜层的光学特性和散射特性,也会减小输出能量。因此,保证小角度入射是应用传能光纤的重要条件。

## 4 光纤输出光焦点问题的讨论

在束腰处,激光的会聚作用最强,因此光束腰问题一直是激光技术中理论研究和应用的关键问题。本节将讨论经过空芯光纤的激光光束是否也如激光器输出光束一样存在光束腰(也称出射光焦点),并对 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤传输 CO<sub>2</sub> 激光的实例进行了测量。

### 4.1 光在自由空间的传播

光束的传播可分为自由空间(又称均匀介质)中的传播和波导中的传播,对光纤输出光束的研究基于前者。光在自由空间中的传播是用衍射来描述的,激光能量分布为高斯函数

$$|\phi(r)| = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \quad (1)$$

式中,  $w(z)$  为光斑尺寸。

在  $z = 0$  时光斑尺寸  $w(z_0)$  为最小值  $w_0$ , 由于在该位置光束的直径最小,故称光束腰。高斯波束的波面是中心置于波束腰处的球面波,其振幅呈高斯分布。光束经过光束腰后的包络线轨迹大体上可以分为菲涅耳区(Fresnel Area 或近场区)与夫琅禾费区(Fraunhofer Area 或远场区),波函数分别满足下式方程。

菲涅耳近似公式为

$$\Psi(x', y') = \frac{j}{\lambda d} e^{-jk d} \times \iint_{S_1} \phi(x, y) \exp\left[-jk \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2d}\right] dx dy \quad (2)$$

夫琅禾费近似公式为

$$\Psi(x', y') = \frac{j}{\lambda d} \exp\left[-jk \left(d + \frac{x'^2 + y'^2}{2d}\right)\right] \times \iint_{S_1} \phi(x, y) \exp\left(jk \frac{xx' + yy'}{d}\right) dx dy \quad (3)$$

根据公式可得结论:近场区光束基本上不发散;但当光束行进到一定距离的远场区后,开始服从夫琅禾费散射,在这个区域内光束具有明显的发散趋势。

对于出射光焦点问题,美国 Harrington 教授<sup>[8]</sup>曾经在 1995 年给出了 CO<sub>2</sub> 激光经过蓝宝石空芯光纤出射光焦点的实验数据。结果说明:激光器产生的真空高斯光束经过纯蓝宝石晶体空芯光纤后仍有光束腰,且束腰位置随着光纤芯径的增大而增大。

但吉林大学对 CO<sub>2</sub> 激光经过多晶态纯 GeO<sub>2</sub> 空芯光纤<sup>[9,10]</sup> 的出射光焦点进行测量,结果输出光束

却没有焦点<sup>[11]</sup>。纯 GeO<sub>2</sub> 是与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类似的晶体,理论上应该得到相同的结果。

为了验证这一差别,我们用下面实验研究 CO<sub>2</sub> 激光经过 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤的出射光焦点问题。

### 4.2 出射光焦点的测量

通过测量距离光纤出口端不同距离位置上的光斑尺寸(见表 1),将测量结果连线可得到出射光束的包络线。观察包络线是否存在一个先会聚再发散的位置,就可推断光束腰或出射光焦点是否存在。

表 1 不同位置光斑尺寸的测量结果

Table 1 Experiment outcome of beam size at different location

Number	Distance/cm	Shining time/s	Beam diameter/mm
1	0.1	60.10	0.97
2	0.4	60.40	1.03
3	0.7	60.40	1.12
4	1.0	60.30	1.21
5	1.3	59.80	1.20
6	1.6	60.37	1.25
7	1.9	60.00	1.27
8	2.2	60.53	1.30
9	2.5	59.97	1.30
10	2.8	60.75	1.27
11	3.1	60.28	1.49
12	3.4	60.37	1.60
13	3.7	60.09	1.81

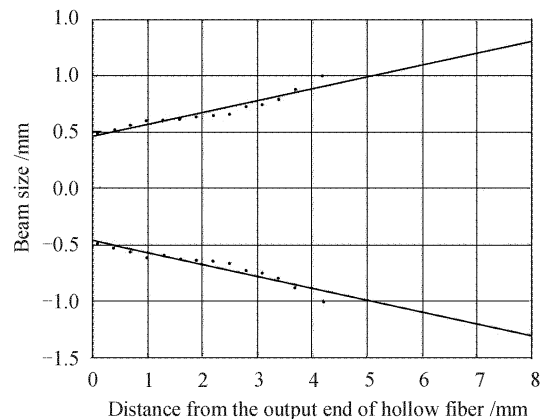


图 4 经过 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤 CO<sub>2</sub> 激光的包络线

Fig. 4 Beam profile of CO<sub>2</sub> laser passed through Ge/GeO<sub>2</sub> hollow fiber

通过表中数据绘制出光纤输出光束的包络线如图 4。从图中可看出 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤出射光在一段距离之内基本上不发散,经过一段距离后开始有发散趋势,且没有发现类似 Harrington 在文献[8]中提到的光束腰。

通过分析认为:从激光器原理来看,激光器产生光束存在光束腰是由于激光器的谐振腔带有两个高反射率镜子且距离出口远的反射镜面略凹的原因造成的。对经过空芯光纤的激光束而言,不能把空芯光纤的纤芯看作是激光器中的谐振腔。由于空芯光纤的两个端口是开放的,即没有与谐振腔同样的纵向(光传输方向)反射存在,更没有凹面镜存在,因此空芯光纤的出射光束不应该存在输出光焦点。

## 5 结 论

介绍了一种测量空芯光纤输出能量分布的简便方法,并讨论了能量分布在两个方面的应用,同时针对 Ge/GeO<sub>2</sub> 空芯光纤输出光焦点的测量结果与 Harrington 对蓝宝石光纤的测量结果的不一致进行了讨论。

### 参 考 文 献

- 1 S. Choi, K. Oh, W. Shin *et al.*. Novel mode converter based on hollow optical fiber for gigabit LAN communication [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2):248~250
- 2 R. J. George, J. A. Harrington. Hollow plastic waveguides for sensor applications [C]. *SPIE*, 2001, **4204**:230~237
- 3 Abe Yukio, Iwai Katsumasa, Miyagi Mitsunobu *et al.*. Er:YAG laser delivery system for dental application using small-bore hollow fibers [C]. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest*, 2001, **1**:I242~I243
- 4 Shunichi Sato, Makoto Ogura, Minoru Obara *et al.*. Hollow-waveguide-based laser-to-ultrasound transducer for drug delivery application [C]. *SPIE*, 2002, **4616**:207~211
- 5 Hou Lantian, Sun Yingzhi, Zhao Bin. Optical properties of GeO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O hollow core optical fiber material [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10):1423~1427  
侯蓝田,孙英志,赵斌. GeO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O 玻璃空芯光纤材料的光学特性研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(10):1423~1427
- 6 Hou Lantian, Fu Lianfu, Lü Ping *et al.*. Pure germanium dioxide hollow-core fiber for transmitting CO<sub>2</sub> laser [J]. *Science in China (Series A)*, 1995, **25**(4):444~448  
侯蓝田,付连符,吕平等. 二氧化锗空芯光纤的研究[J]. *中国科学(A 辑)*, 1995, **25**(4):444~448
- 7 Lantian Hou, Lianfu Fu, Ping Lü *et al.*. Polycrystalline germanium dioxide hollow-core fibers and their performance [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1997, **38**(3):193~199
- 8 Y. Matsuura, T. Abel, J. A. Harrington. Optical properties of small-bore hollow glass waveguides [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6842~6847
- 9 Du Jiuhui, Yang Yi, Zhou Guiyao *et al.*. Analysis on small bore hollow fibers for transmitting laser energy [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(4):427~429  
堵久辉,杨义,周桂耀等. 小芯径空芯传能光纤的理论分析[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(4):427~429
- 10 Yang Yi, Zhou Guiyao, Hou Zhiyun *et al.*. Study on transmitting character in GeO<sub>2</sub> dielectric hollow waveguides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):301~304  
杨义,周桂耀,侯峙云等. GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的传输特性分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):301~304
- 11 Lantian Hou, Xinqi Wang, Zhongshan Li *et al.*. Transmission characteristic of GeO<sub>2</sub> hollow fiber [C]. *SPIE*, 1999, **2893**:309~314