

# 用于 CO<sub>2</sub> 激光传输的 10.6 μm 波段空心布拉格光纤

金 杰 张 巍 石立超 黄翊东 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 空心布拉格光纤是具有—维光子晶体(1DPC)包层和空心芯区的新型光子带隙光纤。针对它在 CO<sub>2</sub> 激光传输中的应用,设计和制备了传输波段中心波长在 10.6 μm 的空心布拉格光纤样品。利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)可以观察到光纤样品在 10.6 μm 具有明显的透射峰。使用 CO<sub>2</sub> 激光,通过截断法测量得到光纤样品在 10.6 μm 的传输损耗为 2.35 dB/m。测量了不同弯曲曲率下光纤样品的弯曲损耗,结果表明弯曲损耗系数随曲率的增大而线性增长。在接近光纤输出端处,弯曲半径为 10 cm 的光纤 90°弯曲引入的附加损耗约为 2 dB。实验结果论证了光纤样品的 CO<sub>2</sub> 激光低损耗传输特性,展现了空心布拉格光纤在提升 CO<sub>2</sub> 激光操作灵活性上的应用潜力。

**关键词** 光纤光学;空心布拉格光纤;CO<sub>2</sub> 激光;—维光子晶体

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805001

## Hollow-Core Bragg Fiber with a Transmission Band of 10.6 μm for Carbon Dioxide Laser

Jin Jie Zhang Wei Shi Lichao Huang Yidong Peng Jiangde

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Hollow-core Bragg fiber is a kind of photonic bandgap fiber which has a cladding of one dimensional photonic crystal (1DPC) and an air core. Aiming at its application on CO<sub>2</sub> laser transmission, a hollow-core Bragg fiber sample with a transmission band of 10.6 μm is designed and fabricated. Its transmission spectrum is measured by Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), showing an obvious low loss transmission peak at 10.6 μm. Measured by cutback method using a CO<sub>2</sub> laser, the transmission loss at 10.6 μm of the fiber sample is 2.35 dB/m. The additional loss induced by fiber bending is also measured under different fiber curvatures, showing that it rises with increasing curvature. Experiments show that a fiber bending of 90° with a bending radius of 10 cm near the fiber output end leads to an additional loss about 2 dB. The experiment results demonstrate the low loss transmission of CO<sub>2</sub> laser by the hollow-core Bragg fiber sample, showing its great potential on improving the flexibility of CO<sub>2</sub> lasers.

**Key words** fiber optics; hollow-core Bragg fiber; CO<sub>2</sub> laser; one dimensional photonic crystal

**OCIS codes** 060.2310; 060.2390; 060.2280; 060.2400

## 1 引 言

CO<sub>2</sub> 激光是最常用的分子气体激光,中心波长一般在 10.6 μm 附近,被广泛应用于激光加工,材料处理和外科医疗等领域<sup>[1,2]</sup>。在这些系统中往往需要对 CO<sub>2</sub> 激光进行空间操控,常用的操控手段是关节式导光臂<sup>[3]</sup>。然而,关节式导光臂的操控灵活

性有限,极大地限制了 CO<sub>2</sub> 激光的应用功能。因此,具有一定柔性地支持 CO<sub>2</sub> 激光低损耗传输的 10.6 μm 波段光纤成为进一步发展 CO<sub>2</sub> 激光应用的迫切需求。近年来,随着微结构光纤的发展,一种由空心芯区和—维光子晶体(1DPC)包层构成的空心布拉格光纤引起了人们普遍的关注<sup>[4]</sup>。它依靠

**收稿日期**: 2012-03-28; **收到修改稿日期**: 2012-04-17

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327606)和北京市自然科学基金(4102028)资助课题。

**作者简介**: 金 杰(1986—),男,硕士研究生,主要从事微结构光纤方面的研究。E-mail: j-jin09@mails.tsinghua.edu.cn

**导师简介**: 张 巍(1974—),男,博士,副教授,主要从事微纳结构光电功能材料和器件等方面的研究。

E-mail: zwei@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

1DPC 带隙导光,支持空心传输;采用预制棒熔拉法制备,适合大量生产降低成本;特别是它可以使用聚合物材料和在中红外波段透明的半导体玻璃材料制备,具备在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段空心导光的功能,展现了在 $\text{CO}_2$ 激光传输领域中诱人的应用前景。

本文针对空心布拉格光纤在 $\text{CO}_2$ 激光传输中的应用,设计和制备了传输波段中心波长在 $10.6\ \mu\text{m}$ 的空心布拉格光纤样品,并对光纤样品的传输谱、传输损耗和弯曲损耗特性进行了系统的实验研究,实验结果论证了制备出的空心布拉格光纤样品对于 $\text{CO}_2$ 激光的低损耗传输特性。

## 2 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段空心布拉格光纤的设计

空心布拉格光纤的结构示意如图 1 所示。图 1(a)为光纤整体横截面示意图,白色区域为光纤的空心芯区,其外为两种折射率不同的材料周期性交替层叠形成的 1DPC 结构,实现带隙导光功能。光纤的最外层是起保护和支撑作用的聚合物[聚酰亚胺(PEI)]外包层。

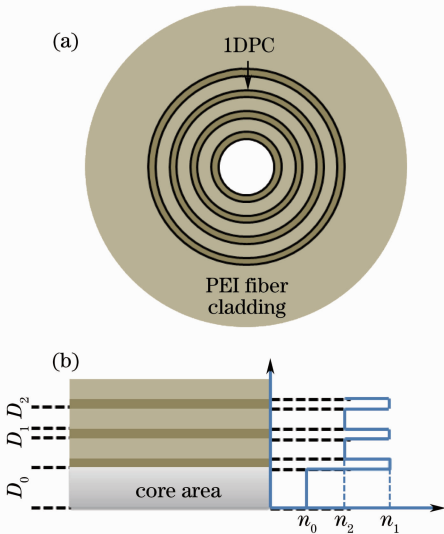


图 1 (a)空心布拉格光纤横截面示意图;(b)空心布拉格光纤相应平面 1DPC 结构

Fig. 1 (a) Cross-sectional schematic of hollow-core fiber; (b) schematic of the 1DPC in hollow-core Bragg fiber

对于大芯区直径的空心布拉格光纤,可以将 1DPC 层近似为平面,利用平面 1DPC 的能带图确定空心布拉格光纤的传输波段<sup>[5,6]</sup>。图 1(b)是相应平面 1DPC 结构及其主要参数定义。其中,高折射率层的厚度和折射率分别为 $D_1$ 和 $n_1$ ,低折

射率层的厚度和折射率为 $D_2$ 和 $n_2$ ,1DPC 的周期用 $\Lambda$ 表示,则有 $\Lambda = D_1 + D_2$ 。

为实现在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段的空心导光,选择了对中红外透明的半导体玻璃硒化砷( $\text{As}_2\text{Se}_3$ )作为高折射率层材料,有机聚合物聚醚砜树脂(PES)作为低折射率层材料制备空心布拉格光纤。这两种材料在 $10.6\ \mu\text{m}$ 附近的折射率分别为 2.73 和 1.68,大的折射率差决定了以此为基础的 1DPC 具有宽光谱和宽角度的光子带隙,可以有效地实现空心布拉格光纤中的带隙导引限光机制。

为了确定空心布拉格光纤以及预制棒的结构参数,计算了图 1(b)所示 1DPC 的光子能带特性,能带图如图 2 所示,其中 $\omega$ 为光波频率, $\beta$ 为平行于周期层方向的波矢分量。计算中考虑到光纤制备工艺的限制,将两种材料厚度的比值 $D_1 : D_2$ 设为 1:2。图中实线和虚线分别对应 1DPC 中 TE 和 TM 偏振模式的光子带隙边界,标注区域即为光子带隙。可见,由于 TM 模式存在布儒斯特现象, TM 偏振模式的光子带隙总窄于 TE 模式的光子带隙。在大芯径的空心布拉格光纤中,在空心芯区内传播的低阶导波模式可以认为是光波以掠射方式入射到芯区(空气)与包层 1DPC 的界面发生全反射形成的,所以低阶导波模式的色散曲线非常接近空气辐射线(图 2 中的点线)并总在它的上部。因此,可以用 TM 模式带隙边界与空气辐射线的交点大致确定空心布拉格光纤的多模传输通带。由光子晶体的尺度变换特性,空心布拉格光纤的传输通带可以根据光纤中 1DPC 的实际周期,利用图 2 所示的归一化能带图计算得到。图 2 中,最低阶传输通带的归一化中心频率 $\omega\Lambda/2\pi c$ 为 0.316,对于传输通带在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段的光纤,则要求 1DPC 的周期约为 $3.35\ \mu\text{m}$ ,相应的

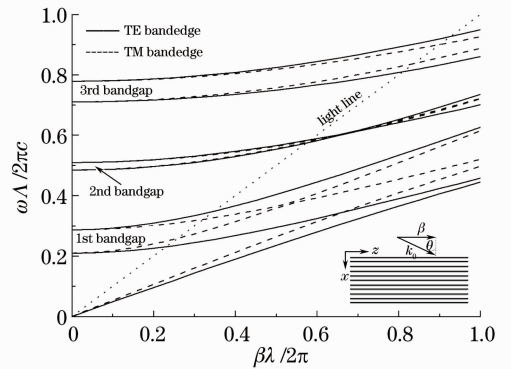


图 2 空心布拉格光纤包层 1DPC 的光子能带图  
Fig. 2 Band structure of 1DPC in the hollow-core Bragg fiber

高折射率和低折射率层的厚度分别为  $D_1 \approx 1.1 \mu\text{m}$ ,  $D_2 \approx 2.2 \mu\text{m}$ 。

### 3 10.6 μm 波段空心布拉格光纤的制备

采用预制棒熔拉法制备这种半导体/聚合物基空心布拉格光纤<sup>[7]</sup>。首先采用真空热蒸镀的方法,在洁净的 PES 薄膜的表面蒸镀硒化砷膜层;然后将蒸镀好的薄膜紧密卷绕在玻璃管上形成周期层叠结构,并在其上卷绕没有蒸镀硒化砷的 PEI 薄膜作为机械支撑,将该棒固定后放入真空炉中烧结成整体;再用氢氟酸(HF)腐蚀掉中间的玻璃棒,形成内壁具有一维周期结构的中空预制棒;最后使用光纤拉丝设备将预制棒拉制成空心布拉格光纤。

空心布拉格光纤依靠包层 1DPC 的光子带隙实现限光功能,光纤的直径波动会直接影响光子带隙的位置,使光纤不同部分的传输波段不完全重叠,进

而极大地降低光纤的传输特性。本课题组的先期工作表明空心布拉格光纤的直径波动应控制在 6% 之内<sup>[8]</sup>,因此,光纤拉制过程中对光纤外径波动的控制是保证光纤质量的关键。为此,为光纤拉丝设备引入了光纤直径反馈控制系统。使用激光测径仪测量光纤刚拉出时的直径,送入计算机与预设直径值比较,采用比例-积分-微分(PID)算法计算电机转速的改变量并送入拉丝电机控制箱,通过改变拉丝速度,将光纤直径控制在预设值附近。图 3 中给出了光纤拉丝设备直径反馈控制系统的工作效果。图 3(a)是在光纤外径设定值改变时光纤直径监测的记录,表明光纤直径反馈控制系统可以在外径预设值改变(图中箭头所示时刻)后快速调整光纤外径并使之稳定。图 3(b)是拉丝设备稳定工作状态下光纤外径的波动情况,外径波动的标准偏差约为 1.2%,满足空心布拉格光纤对外径波动容限的要求。

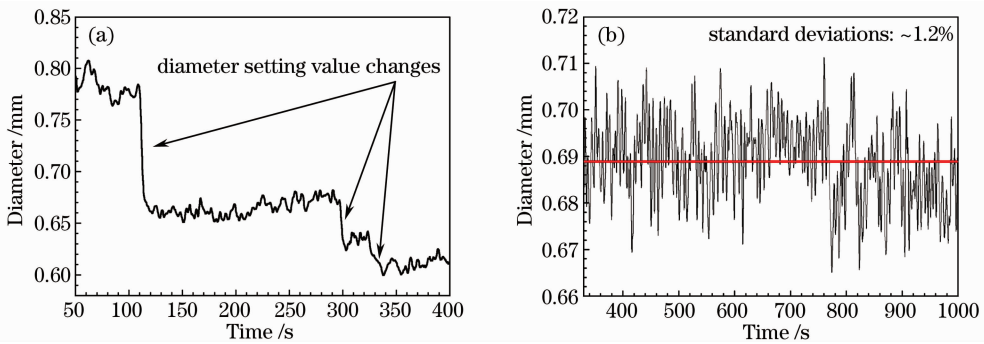


图 3 (a) 光纤外径快速调整; (b) 拉丝稳定状态的外径实时记录

Fig. 3 (a) Rapid adjustment of the fiber's outer-diameter; (b) a real-time record of the fiber's outer-diameter in steady drawing state

按照上述的制备工艺,制作了内径为 550~600 μm,外径为 1150~1250 μm,一阶带隙传输波段中心波长在 10.6 μm 的空心布拉格光纤,图 4(a)是光纤样品横截面的扫描电镜(SEM)照片,为了在

制作电镜样品过程中保持光纤结构,光纤芯区填充环氧树脂。由图 4(a)可以清晰地观察到光纤包层的 1DPC 结构,白色条纹为硒化砷构成的高折射率层,暗色条纹为 PES 构成的低折射率层。图 4(b)为

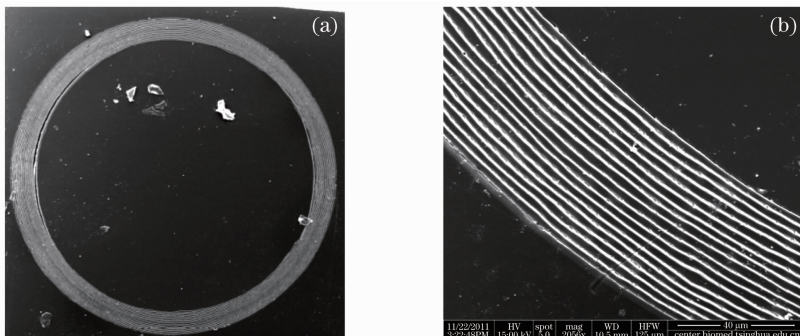


图 4 空心布拉格光纤样品横截面电子显微镜照片

Fig. 4 Cross-sectional SEM micrographs of the Bragg fiber mounted in epoxy

光纤样品中一维光子晶体的局部放大 SEM 图,由此可知,  $\Lambda \approx 3 \mu\text{m}$ , 其中  $\text{As}_2\text{Se}_3$  膜层约占 1/3, 其厚度  $D_1$  则约为  $1 \mu\text{m}$ , 与理论设计相符。

#### 4 空心布拉格光纤样品的 $\text{CO}_2$ 激光传输特性测试

首先利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测量了一段长 30 cm 的光纤样品的透射谱, 结果如图 5 所示。可见, 光纤样品在  $10.6 \mu\text{m}$  (波数为  $943 \text{ cm}^{-1}$ ) 附近有明显的透射峰, 对应包层 1DPC 的一阶光子带隙。利用这一传输特性, 空心布拉格光纤样品支持  $\text{CO}_2$  激光传输。

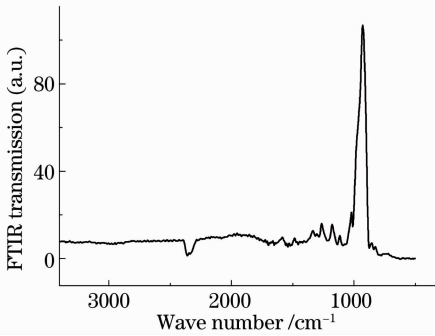


图 5 空心布拉格光纤样品的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the Bragg fiber

进而搭建了由  $\text{CO}_2$  激光器、激光聚束耦合装置和  $\text{CO}_2$  激光功率计组成的光纤传输损耗测试系统, 研究空心布拉格光纤样品对于  $10.6 \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光的传输特性。 $\text{CO}_2$  激光器输出端光腰直径约为  $2.4 \text{ mm}$ , 全角发散角为  $5.5 \text{ mrad}$ , 经过聚束耦合装置后, 激光光束被聚焦到光纤端面位置, 光斑直径约为  $310 \mu\text{m}$ 。测试系统搭建过程中的一个关键问题是避免光束向光纤样品空心芯区耦合对准的过程中由于高功率激光直接照射光纤端面造成光纤的损坏。为此, 为半导体聚合物空心布拉格光纤设计并定制了一种全氧化锆陶瓷的光纤端面保护套管, 使光纤样品可在  $10 \text{ W}$  的入射光功率下连续工作  $20 \text{ min}$  以上。值得指出的是, 实验中未采用任何光纤冷却措施。可以预计, 若引入红外空心光纤常用的对光纤端面和光纤中孔进行风冷的措施<sup>[9]</sup>, 光纤样品的承受光功率将进一步大幅度提升。

使用一段长  $1.7 \text{ m}$  的光纤样品通过截断法测量了光纤的  $\text{CO}_2$  激光传输损耗, 测量结果如图 6 所示。可见, 光纤样品传输激光功率 ( $P_T$ ) 随光纤长度的增加线性减小, 拟合得到光纤样品对  $\text{CO}_2$  激光的传输损耗为  $2.35 \text{ dB/m}$ 。

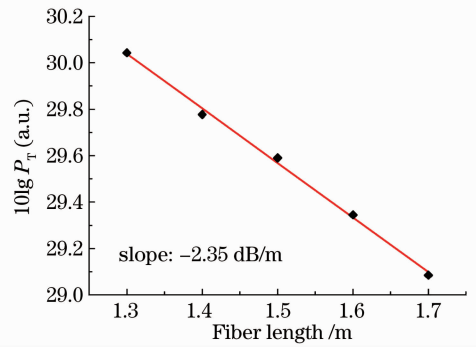


图 6 光纤样品的  $\text{CO}_2$  激光传输损耗测量结果

Fig. 6 Transmission loss of the Bragg fiber transmitted  $\text{CO}_2$  laser

光纤的本征损耗源自材料吸收和有限的 1DPC 包层引入的泄漏损耗。在  $10.6 \mu\text{m}$  波段, 硒化砷材料几乎透明, 而 PES 聚合物损耗系数超过  $3 \times 10^4 \text{ dB/m}$ <sup>[10]</sup>。如果空心布拉格光纤传输模式的电磁能量集中在空心芯区, 可极大地减小材料吸收的影响。本文利用传输矩阵法<sup>[11]</sup>理论计算了实验光纤样品的最低阶模式  $\text{HE}_{11}$  模在  $10.6 \mu\text{m}$  波段的传输损耗, 损耗为  $1.2 \text{ dB/m}$ 。在实验中, 光纤样品制备工艺不理想引入的光纤结构参数不均匀和制备环境的洁净度不够引入的光纤包层 1DPC 界面缺陷是光纤损耗增加的主要原因。此外, 空心布拉格光纤芯径较大, 支持极多的传播模式, 理论计算表明高阶模式的损耗远大于低阶模式<sup>[8]</sup>。而光纤中各传播模式的激励情况由光纤端面光耦合条件决定, 在实验中已经发现空心布拉格光纤的传输损耗与光纤端面的光耦合情况密切相关, 因此, 实验测量的光纤传输损耗部分来自于光纤中难以避免的高阶模式传输。

而后, 测试了空心布拉格光纤样品对  $\text{CO}_2$  激光的弯曲损耗特性, 测试过程中保持激光器的输出功率不变。测试采用一段  $1.7 \text{ m}$  长的光纤样品, 首先在平直状态下测量光纤的输出功率  $P_s$ ; 然后保持光纤两端部分平直且松弛, 在中间  $50 \text{ cm}$  长的部分用不同半径的标准圆盘弯曲, 测量不同曲率下光纤的输出功率  $P_c$ 。将不同弯曲曲率下光纤的输出功率  $P_c$  与平直光纤的输出功率  $P_s$  相除, 作相应的数据处理, 得到  $50 \text{ cm}$  长的光纤弯曲造成的附加损耗值, 进而折算成以  $\text{dB/m}$  为单位的光纤弯曲损耗  $[-20 \lg(P_c/P_s), \text{dB/m}]$ 。光纤样品对  $\text{CO}_2$  激光的弯曲损耗测量结果如图 7 所示。可见, 光纤样品的弯曲损耗系数总体随光纤曲率 ( $1/R$ ) 的增加而线性增长, 与圆空心波导弯曲特性的理论预测相符<sup>[12]</sup>。

在实际应用中, 往往需要将  $\text{CO}_2$  激光波导在输

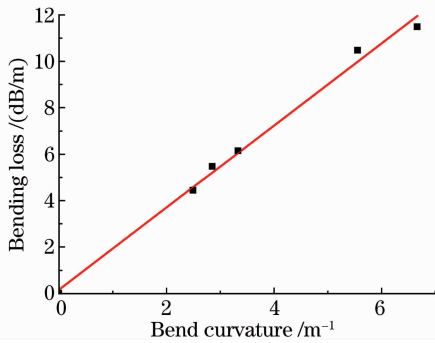


图 7 光纤样品对 CO<sub>2</sub> 激光的弯曲损耗测量结果  
Fig. 7 Bending loss of the Bragg fiber transmitted CO<sub>2</sub> laser

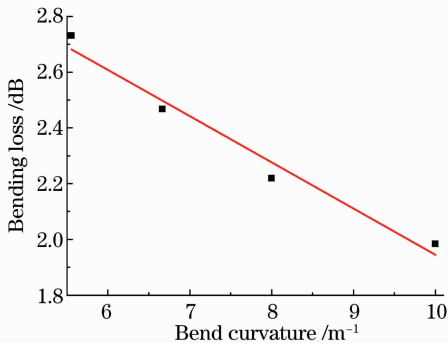


图 8 光纤样品弯曲 90°附加损耗测量结果  
Fig. 8 Bending loss for 90° bends of the Bragg fiber transmitted CO<sub>2</sub> laser

出端附近弯曲一个特定角度。曲率小的光纤弯曲尽管弯曲损耗系数小,但需要用较长的光纤来实现,两者的综合作用需要考察。针对这一应用形式,测量了将光纤以不同曲率在输出端附近正圆弧弯曲 90°,并保证距光纤出射口有 15 cm 光纤准直时所引入的附加损耗 $[10\lg(P_c/P_s), \text{dB}]$ ,结果如图 8 所示。实验结果表明光纤 90°弯曲的附加损耗随弯曲曲率增加略有下降,变化不大。在弯曲半径为 10 cm 时附加损耗约为 2 dB。

## 5 结 论

针对空心布拉格光纤在 CO<sub>2</sub> 激光传输中的应用,设计和制备了传输波段中心波长在 10.6 μm 的空心布拉格光纤样品,并对光纤样品的传输谱、传输损耗和弯曲损耗特性进行了系统的实验研究。

FTIR 测试可以观察到光纤样品在 10.6 μm 处具有明显的透射峰。利用 CO<sub>2</sub> 激光器测量光纤样品在 10.6 μm 的传输损耗为 2.35 dB/m。测量了不同弯曲曲率下光纤样品的弯曲损耗,结果表明弯曲损耗系数随曲率的增大线性增长。在距光纤出射端 15 cm 处以 10 cm 的弯曲半径将光纤弯曲 90°,引入的附加损耗约为 2 dB。实验结果论证了制备出的空心布拉格光纤样品对于 CO<sub>2</sub> 激光的低损耗传输特性,展现了它在提升 CO<sub>2</sub> 激光操作灵活性上的潜力。

## 参 考 文 献

- 1 N. Tabata, S. Yagi, M. Hishii *et al.*. Present and future of lasers for fine cutting of metal plate[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, **62**(4): 309~314
- 2 R. W. Ryan, T. Wolf, R. F. Spetzler *et al.*. Application of a flexible CO<sub>2</sub> laser fiber for neurosurgery: laser-tissue interactions [J]. *J. Neurosurg*, 2010, **112**(2): 434~443
- 3 R. W. Ryan, T. Walf, R. F. Spetzler *et al.*. Aura of technology and the cutting edge: a history of lasers in neurosurgery[J]. *Neurosurg Focus*, 2009, **27**(3): E6
- 4 B. Temelkuran, S. D. Hart, G. Benoit *et al.*. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO<sub>2</sub> laser transmission[J]. *Nature*, 2002, **420**(6916): 650~653
- 5 S. G. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy *et al.*. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core Omni-guide fibers[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 748~779
- 6 Changzhi Li, Wei Zhang, Yidong Huang *et al.*. Numerical study on Bragg fibers for infrared applications[J]. *Inter. J. Infra. & Milli. Waves*, 2005, **26**(6): 893~904
- 7 J. A. Harrington. A review of IR transmitting, hollow waveguides[J]. *Fiber Integr. Opt.*, 2000, **19**(3): 211~227
- 8 Shi Lichao, Zhang Wei, Xing Wenxin *et al.*. Mode transmission characteristics in hollow-core Bragg fibers with slowly variation in outer diameter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2559~2564
- 9 石立超, 张 巍, 邢文鑫等. 外径波动下空心布拉格光纤的模式传输特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2559~2564
- 10 PIR-fiber delivery set for CO<sub>2</sub> laser[EB/OL]. (2012)[2012-04-12]. [http://www.artphotonics.de/products/special-fibers-and-fiber-cables/pir-fiber-cable-delivery-set-for-CO<sub>2</sub>-laser/](http://www.artphotonics.de/products/special-fibers-and-fiber-cables/pir-fiber-cable-delivery-set-for-CO2-laser/)
- 11 A. F. Abouraddy, M. Bayindir, G. Benoit *et al.*. Towards multimaterial multifunctional fibres that see, hear, sense and communicate[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**: 336~347
- 12 Shangping Guo, S. Albin, R. Rogowski. Comparative analysis of Bragg fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 198~207
- 13 M. Miyagi, S. Karasawa. Waveguide losses in sharply bent circular hollow waveguides [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(3): 367~370

栏目编辑:王晓琰