

文章编号: 0258-7025(2004)03-0301-04

# GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的传输特性分析

杨 义, 周桂耀, 侯峙云, 堵久辉, 侯蓝田\*

(燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 介绍了 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的基本结构和相关的 Miyagi 传输损耗公式。在此基础上将通过实验得到的 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯光纤中 HE<sub>11</sub> 模在空芯光纤处于直线状态和弯曲状态下实测损耗值与 Miyagi 传输损耗公式经过插值运算得到的理论预测损耗曲线进行了比较, 并分析了两者存在差异的原因。最后给出了 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯光纤在其处于直线和弯曲状态下的输出能量分布特性。

**关键词** 光电子学; GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤; Miyagi 公式; 直线损耗; 弯曲损耗; 输出能量分布

中图分类号 TN 012 文献标识码 A

## Study on Transmitting Character in GeO<sub>2</sub> Dielectric Hollow Waveguides

YANG Yi, ZHOU Gui-yao, HOU Zhi-yun, DU Jiu-hui, HOU Lan-tian

(Institute of IR Fiber and Sensor, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** The GeO<sub>2</sub> dielectric hollow waveguide structure and the related Miyagi equations are introduced in the report. The transmitting losses of the HE<sub>11</sub> mode in straight and bending GeO<sub>2</sub> dielectric hollow waveguide are analyzed by comparing the curve achieved by the means of Miyagi's equations with the experiment results. The output energy distribution of straight and bending GeO<sub>2</sub> hollow waveguide are given too.

**Key words** optoelectronics; GeO<sub>2</sub> dielectric hollow waveguide; Miyagi equations; straight losses; bending losses; output energy distributions

GeO<sub>2</sub> 在 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光器波段上的复折射系数的虚部和实部分别为 0.57 和 0.82, 所以它是一种制作传输 CO<sub>2</sub> 激光的介质膜空芯传能光纤的优良材料。这种介质膜光纤是双层电介质薄膜结构, 如图 1 所示。在制造这种光纤的过程中先在二

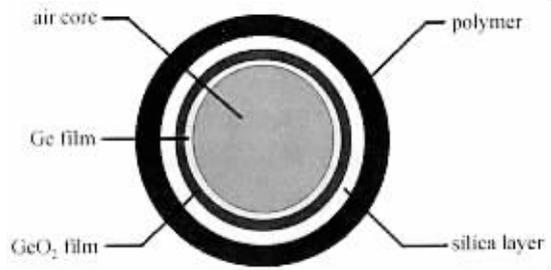


图 1 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的结构

Fig. 1 Structure of GeO<sub>2</sub> hollow waveguide

氧化硅结构管内使用化学气相沉积法内镀一层 GeO<sub>2</sub>, 然后将在 GeO<sub>2</sub> 层内还原出 Ge 膜, 形成介质膜结构。最后在光纤外壁涂覆一层聚合物以增加强度。在实验中已经使用内径为 1 mm 的这种光纤在有水冷的条件下脉冲传输功率(脉宽 0.1 s)为 1000 kW 的脉冲 CO<sub>2</sub> 激光。

### 1 空芯传能光纤性能分析的相关理论

由于红外传能空芯光纤结构上的特殊性, 使得关于常规通讯光纤的一系列理论不能有效地应用于这一领域。所以在近 30 年中逐渐发展出一套专门针对空心光纤的传输理论。

最早对空芯光纤中光能损耗进行分析的是 E. A. J. Marcatilli 和 R. A. Schmelzter<sup>[1]</sup>。他们提出的这一理论体系被称为 M-S 理论。M. Miyagi

收稿日期: 2002-08-09; 收到修改稿日期: 2003-01-13

作者简介: 杨义(1978—), 男, 四川成都人, 燕山大学博士研究生, 现从事光电子学及光纤通讯领域的研究。

\* 通信联系人, E-mail: hlantian@heinfo.net

等<sup>[2]</sup>在 M-S 理论上作出了新的发展。他通过引入一含有空芯传能光纤内径 ( $a$ ) 和曲率半径 ( $R$ ) 的标识量

$$b = (n_0 k_0 a)^2 a / R \quad (1)$$

式中,  $k_0$  为自由空间中的波矢, 并定义了空芯光纤的模式正规化表面阻抗  $z_{TE}$  和导纳  $y_{TM}$  ( $n$  和  $k$  分别为光纤内壁复折射系数的实部和虚部)

$$z_{TE} = [(n - jk)^2 - 1]^{-1/2}$$

$$y_{TM} = \frac{(n - jk)^2}{[(n - jk)^2 - 1]^{1/2}} \quad (2)$$

并且得到传能空芯光纤中各模式的损耗公式:

直线损耗公式

$$\alpha(\infty) = \frac{u_{mm}^2}{2(n_0 k_0 a)^2 a} \text{Re}(z_{TE} + y_{TM}) \quad (3)$$

式中,  $u_{mm}$  为  $HE_{mm}$  模对应的第  $n$  阶第一类 Bessel 函数的第  $m$  个根值。

弯曲损耗公式:

垂直偏振光

$$\alpha_{\perp} = \frac{1}{R} [c_m \text{Re}(z_{TE}) + c_s \text{Re}(y_{TM})] \quad (4)$$

水平偏振光

$$\alpha_{//} = \frac{1}{R} [c_s \text{Re}(z_{TE}) + c_m \text{Re}(y_{TM})] \quad (5)$$

通过插值分析可以得到 Miyagi 公式衰减分解系数  $c_m$  和  $c_s$  的近似值

$$c_m = 1 - 0.231b^{-1/2} - 1.98b^{-1} + 5.20b^{-3/2} \quad (6)$$

$$c_s = 0.570b^{-1/2} + 1.12b^{-1} + 1.45b^{-3/2} \quad (7)$$

相对于 M-S 理论, Miyagi 公式具有较高的精度, 与实验结果吻合得较好。

## 2 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的损耗特性

GeO<sub>2</sub> 在 10.6  $\mu\text{m}$  处的复折射率为  $0.57 - 0.82i$ <sup>[3]</sup>, 由于其复折射系数的实部小于 1, 所以从结构上讲它属于衰减全反射 (ATR) 光纤。由于在制造过程中 GeO<sub>2</sub> 层外又还原出了一层锗介质膜, 所以在光纤结构上形成了介质膜结构。由于所镀锗层厚度约为 5  $\mu\text{m}$ , 所以对光纤内壁的折射率没有太大影响, 即内壁复折射系数与 GeO<sub>2</sub> 近似相等<sup>[4]</sup>。依据 M-S 和 Miyagi 的理论, 在这种情况下, 光纤中传输模为 HE<sub>11</sub> 模。

为了验证 GeO<sub>2</sub> 介质膜空心光纤的各项特性, 使用一台功率为 30 W 的 CO<sub>2</sub> 可选模激光器通过光栅, 经一焦距为 150 mm Zn<sub>2</sub>Se 透镜向光纤中耦合

能量。光纤输出能量由一台光敏式能量计进行测量。实验系统如图 2 所示。

实验发现, 在光纤中 HE<sub>11</sub> 模的损耗通常为 HE<sub>12</sub> 模的 25% 以下。在光纤内径为 0.55 mm 时, HE<sub>12</sub> 模的损耗甚至达到了 HE<sub>11</sub> 模的 5 倍<sup>[5,6]</sup>。这说明 HE<sub>11</sub> 模确为 GeO<sub>2</sub> 空芯光纤中的传输模, 它的损耗决定了光纤中损耗的大小。

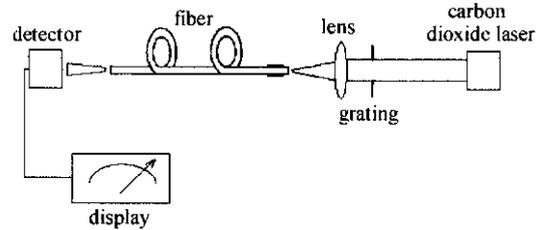


图 2 实验装置

Fig. 2 Structure of the experiment system

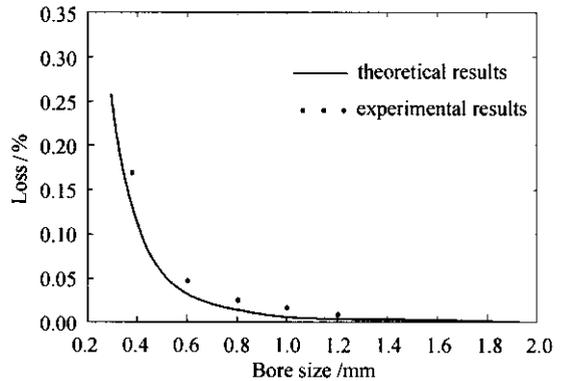


图 3 HE<sub>11</sub> 模在 GeO<sub>2</sub> 传能空芯光纤中直线损耗的理论值和实测值

Fig. 3 Theoretical (solid curve) and measured attenuation for HE<sub>11</sub> mode in a hollow GeO<sub>2</sub> waveguides

由于在光纤中传输模是 HE<sub>11</sub> 模, 在这种情况下, 将相应的参量代入 Miyagi 理论的公式 (4), (5), 并利用 (6), (7) 式对  $c_m$  和  $c_s$  进行近似分析。令光纤内径由 0.3 mm 至 1.0 mm 变化, 得到的理论与实验结果示于图 3。由图可以看出 GeO<sub>2</sub> 介质膜空心光纤中 HE<sub>11</sub> 模的损耗近似与内径的立方成反比。但是实际损耗略高, 这主要是由于透镜向光纤中耦合能量时激起少量衰减较高的高阶模所造成的。

为了测试 GeO<sub>2</sub> 介质膜空心光纤在弯曲状态下的附加损耗, 选择一条长度为 1 m, 内径为 1 mm 的 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤。相应地, 理论分析都设定在光纤内径为 1 mm 的状态下进行。

对于 Miyagi 公式, 分别使用公式 (4), (5) 对垂直偏振光和水平偏振光进行了计算。在计算过程中

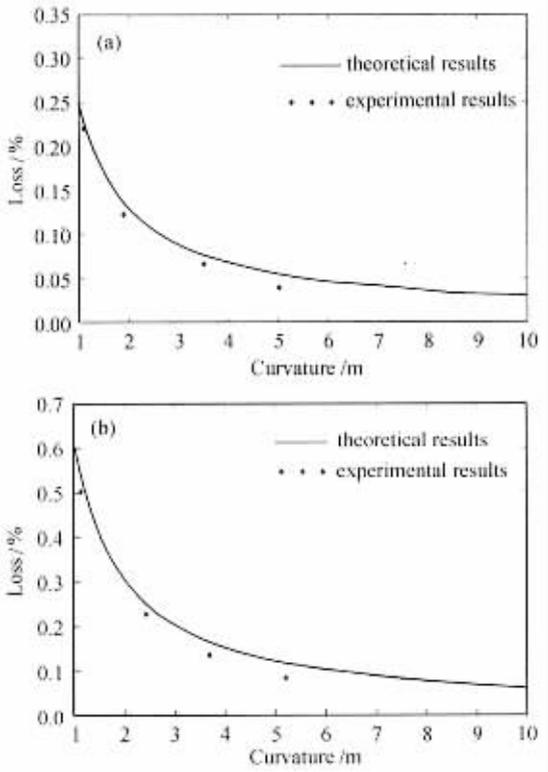


图4 GeO<sub>2</sub> 介质膜传能空芯光纤中 HE<sub>11</sub> 模垂直偏振光 (a)和水平偏振光(b)弯曲损耗的理论值与实测值  
 Fig.4 Theoretical (solid curve) and measured bending losses for perpendicular light (a) and parallel polarization light (b) of HE<sub>11</sub> mode in a hollow GeO<sub>2</sub> waveguides

近似地使用了通过插值分析得到的  $c_m$  和  $c_s$  以减少由于积分引起的复杂运算。计算结果与实验测得值如图 4(a),(b)所示。由图中可以看到 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的水平偏振光的弯曲损耗要大于垂直偏振光的弯曲损耗,即光纤弯曲对水平偏振光影响较大。

实验发现光纤弯曲损耗的实测值要小于理论值,这是由于 Miyagi 理论在讨论光纤壁对光线的反射作用时没有考虑由于附加介质膜而形成的光程差对原有光的叠加作用。而 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤由于在 GeO<sub>2</sub> 的内壁又覆盖了锗层形成了介质膜结构,使光场较为集中在光纤芯内,从而降低了损耗,使其具有更为理想的损耗特性。

### 3 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤的输出能量分布特性

红外空芯光纤多用作能量传输介质,在使用过程中经常会发生弯曲,所以需要其在弯曲时尽可能地保持输出能量分布。因此也对 GeO<sub>2</sub> 介质膜空芯传能光纤输出能量分布的变化进行了分析。在测试中同样使用了 30 W 的 CO<sub>2</sub> 激光器通过焦距为 130 mm Zn<sub>2</sub>Se 透镜向光纤中耦合能量。首先对一根长度为 1 m 处于直线状态下的 GeO<sub>2</sub> 介质膜传能空芯光纤输出能量分布使用光敏式能量计进行2D

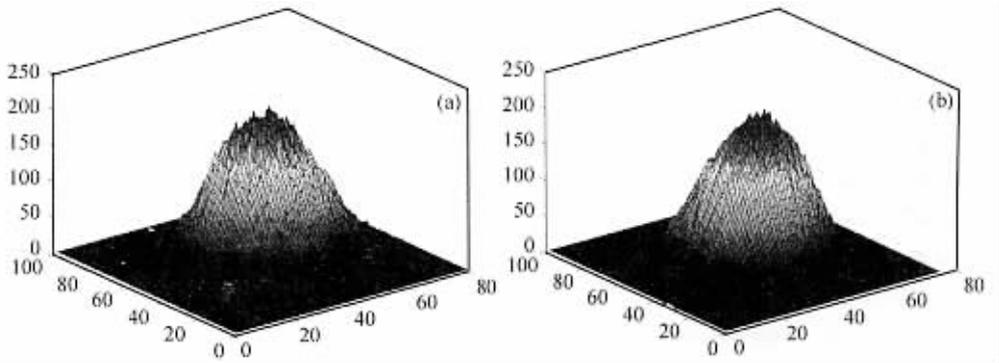


图5 GeO<sub>2</sub> 介质膜传能空芯光纤直线(a)和弯曲(b)状态下的能量分布  
 Fig.5 Energy distributions in a linear (a) and bending (b) hollow GeO<sub>2</sub> waveguides

场扫描,而后作出能量分布图。然后将其弯成 1/4 圆,依照前述方法进行测量。这两次测得的能量分布见图 5,图 6。

由图 5,图 6 可以看出,当光纤弯曲时的能量分布与光纤处于直线状态下的能量分布相比并未出现大的畸变,很好地保持了模式的输出分布。

根据空芯光纤中的模式耦合理论<sup>[6,7]</sup>,低阶模向高阶模转移的能量近似与该低阶模分布在光纤包层中的能量大小成正比。由于光纤弯曲时内部的光场在介质膜的内外两个边界发生叠加,使光纤工作在远截止的状态下,相对于常规结构的空芯光纤,介质膜空芯光纤的光能相对较为集中在空芯中,这样在光纤弯曲时仅有少量能量从低阶模向高阶模泄

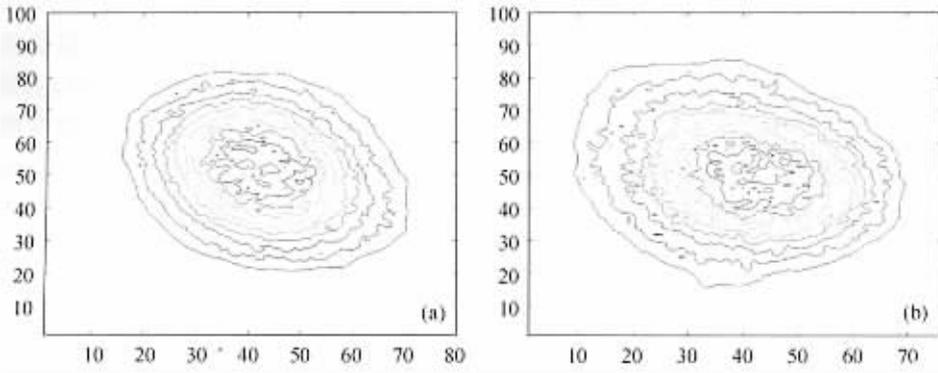


图 6  $\text{GeO}_2$  介质膜传能空芯光纤直线(a)和弯曲(b)状态下的能量分布剖面图

Fig. 6 Contour of energy distributes in a linear (a) and bending (b) hollow  $\text{GeO}_2$  waveguides

漏,有效地减小了由于弯曲激起的高次模,从而使光纤具有良好的弯曲模式特性。

## 4 讨 论

$\text{GeO}_2$  介质膜传能空芯光纤具有弯曲损耗小、输出模场特性稳定等优点。但是在实验中也发现由于它结构上的特殊性使现有理论在对其进行性能分析时会产生误差。这主要是由于现有理论在计算光纤内壁对光的反射作用时未考虑介质膜对光能产生的叠加作用,这需要引入一个与介质膜相关的修正量进行纠正。相信随着对介质膜空芯光纤中光场结构认识的进一步深化,实际测试数据的不断丰富,这方面的问题将会得到更加准确的分析, $\text{GeO}_2$  红外介质膜传能空芯光纤的性能必将进一步提高,并将得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 E. A. J. Marcatilli, R. A. Schmelzter. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers [J]. *Bell Syst. Technol.*, 1964, **43**:1783~1809
- 2 M. Miyagi, K. Hanada, S. Kawakami. Wave propagation and attenuation in the general class of circular hollow waveguides with uniform curvature [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1984, **MTT-32**(5):513~521
- 3 Hou Lantian, Fu Lianfu, Lü Ping *et al.*. Pure germanium dioxide hollow-core fiber for transmitting  $\text{CO}_2$  laser [J]. *Sinence in China (Series A)*, 1995, **38**(6):749~756
- 4 Hou Lantian, Fu Lianfu, Lü Ping *et al.*. Polycrystalline germanium dioxide hollow-core fibers and their performance [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1997, **38**(1):193~199
- 5 Hou Lantian, Sun Yingzhi, Zhao Bin. Study on the mode losses and bending losses of hollow-core optical fiber of  $\text{GeO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  bases for transmitting  $\text{CO}_2$  laser energy [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(1):27~32
- 6 M. E. Marhic. Mode-coupling analysis of bending losses in IR metallic waveguides [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(9):3436~3441
- 7 S. Abe, M. Miyagi. Transmission and attenuation of vector modes in uniformly bent circular hollow waveguides for the infrared [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1992, **40**(5):903~908