

12

# 传感与传能用蓝宝石单晶光纤的生长与光学特性\*

叶林华

(浙江大学物理系, 浙江, 杭州, 310027)

TN253

**A 摘要** 用激光加热小基座法生长了直径为 200~1000 $\mu\text{m}$ , 长度达 50cm 的蓝宝石单晶光纤. 对蓝宝石单晶光纤的光学传输特性进行了分析和测试, 结果表明蓝宝石单晶光纤在可见到近红外波段具有良好的光学传输特性, 可应用于高温传感和医用近红外激光传输.

**关键词** 蓝宝石单晶光纤, 光纤传感器, 红外传能.

## 引言

蓝宝石( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )单晶物理化学性能稳定, 机械强度高, 本质绝缘, 耐腐蚀, 在 0.3~4.0 $\mu\text{m}$  波段范围内透光性很好, 熔点高达 2045 $^\circ\text{C}$ , 是一种优良的近红外光学材料, 蓝宝石单晶光纤既具有蓝宝石单晶的优良特性又有光波导的特点, 使它在高温光纤传感和近红外传能等领域具有很好的应用前景. 在高温传感领域目前已研制成宽测温范围、高精度、高分辨率、宽频带的蓝宝石单晶光纤高温计<sup>[1]</sup>. 在红外传能领域目前蓝宝石单晶光纤已被成功应用于波长为 2936nm 的医用 Er:YAG 激光传输<sup>[2]</sup>.

本文报导了蓝宝石单晶光纤的制备和光学损耗测试及其在高温传感技术中的应用等方面研究工作.

## 1 蓝宝石单晶光纤的制备

蓝宝石单晶光纤用激光加热小基座法(简称 LHPG 法)生长<sup>[3]</sup>. 图 1 所示两束聚焦后的 CO<sub>2</sub> 激光融化蓝宝石单晶源棒的顶部, 将籽晶浸入熔区, 适当控制籽晶的拉速和源棒的送速, 就可以生长出蓝宝石单晶光纤. 在稳态生长条件下熔区的质量应保持不变, 因此源棒送速与籽晶拉速比可以由等式

$$V_s/V_f = (D_s/D_f)^2$$

计算出来, 式中  $V_s$ 、 $V_f$  分别为源棒送速与籽晶拉速, 相应的  $D_s$  和  $D_f$  分别为源棒直径和单晶光纤直径, 一般速比 ( $V_s/V_f$ ) 可以取 2.0~3.5, 速比过大不利于光纤稳定生长. 在近红外传能应用中, 要求蓝宝石光纤有一定的柔性, 即有一定的弯曲半径, 试验表明, 直径为 110 $\mu\text{m}$  的蓝宝石单晶光纤其弯曲半径可达 10mm, 可以充分满足医用激光传输的要求.

\* "863"计划(编号 715-02-10-021)和国家自然科学基金(编号 69407004)资助项目  
本文 1996 年 12 月 11 日收到, 修改稿 1997 年 1 月 30 日收到

在实际应用中要求蓝宝石单晶光纤具有尽可能低的光学传输损耗,蓝宝石光纤的损耗主要由吸收损耗与散射损耗两部分形成.我们知道纯蓝宝石单晶的本征吸收是很低的,因此蓝宝石光纤吸收损耗主要由光纤内部缺陷和杂质引起,由于我们采用浮区法生长,避免了坩埚的污染,因此存在于单晶源棒的杂质、源棒表面污垢、空气中灰尘、水气和色心是吸收损耗的主要原因,选用高纯源棒、超声清洗源棒表面和保持光纤生长室高度清洁可将吸收损耗减至极小.

散射损耗主要由光纤内部显微缺陷和外部表面不规则(直径波动)引起,严格控制生长工艺条件,将熔区的长度控制在最佳值可以使光纤中显微缺陷数目减小至很低<sup>[4]</sup>.实验表明光纤直径波动是引起散射损耗的主要原因.

有几个因素可以引起光纤的直径波动,光纤生长工艺条件变化,激光加热功率波动,籽晶的拉速和源棒的送速不稳定和单晶源棒的直径波动都可以引起熔区形状的变化,从而直接引起光纤直径的波动. LHPG 法生长蓝宝石单晶光纤时,融化的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  熔体具有相当大的表面张力,由它使熔区支承在源棒上. 光纤生长速度快慢和  $\text{CO}_2$  激光加热功率大小对光纤质量有明显影响. 实验发现当生长速度较低时,光纤的直径易波动,这是由于低速生长时机械振动及激光功率波动或生长速度波动的影响所致;当生长速度过高时,光纤中显微空穴等缺陷明显增多,这是由于提拉速度太快时,结晶不能充分进行,因此必须选择合适的生长速度,蓝宝石光纤在空气中就可以生长,其合适的生长速度一般为  $1\sim 4\text{mm}/\text{min}$ . 同样激光加热功率不足,源棒融化不充分,生长的晶体光纤内部缺陷增多;加热功率太大,容易造成熔区形状不稳定,生长出来的光纤直径波动增大,因此对加热功率大小也要严格控制. 通过对速度的精密控制和对源棒质量的严格挑选,并控制光纤生长工艺条件,直径波动均方根控制在  $1.2\%$  以下. 目前激光加热功率的波动是引起光纤直径波动的主要原因,因此需要对激光功率进行反馈控制,这方面的研究工作正在进行.

## 2 蓝宝石单晶光纤损耗测量

对生长的蓝宝石单晶光纤我们可以先用显微镜对其外表面进行观察,了解光纤直径波动情况,晶纤两端光学抛光以后用 He-Ne 激光从一端入射观察光线传输情况,初步了解光纤内部是否存在大的散射缺陷,对光纤进行初选. 对品质良好的光纤用自行研制的单晶光纤损耗测量仪对其损耗进行进一步测试.

单晶光纤损耗测量仪(见图 2)可以分别测定蓝宝石光纤的吸收损耗和散射损耗<sup>[5]</sup>. 由光源发出的光通过斩波器经单色仪分光,入射到参考光纤的一端,透过参考光纤后从另一端输出的光作为被测光纤的入射光强  $P_1$ , 透过被测光纤端面的出射光强  $P_2$ . 由探测器检测,带积分球的探测器用于测定光纤的散射位置谱,两个探测器将测到的光强分别转换成电信号加到程控锁相放大器放大,图 2 中开关 K 用来选择测量光纤的损耗谱或散射位置谱, A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号存入计算机,计算机完成数据采集和处理,同时控制步进

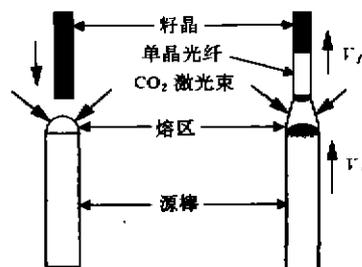


图 1 LHPG 法生长单晶光纤示意图  
Fig. 1 The diagram of LHPG method

电机,分别带动单色仪转动使其自动定位及波长扫描或带动积分球沿被测光纤作轴向移动以及控制程控锁相放大器的放大倍数。

图 3 所示为蓝宝石单晶光纤沿轴向光谱透过率曲线,曲线表明光纤在近红外波段透过率良好,在可见光区有所下降,主要是由于光纤内部色心引起的吸收。图 4 所示为一长度为 10cm 蓝宝石单晶光纤沿轴向散射位置谱,曲线表明此光纤在 8cm 位置处有一大的散射缺陷存在。

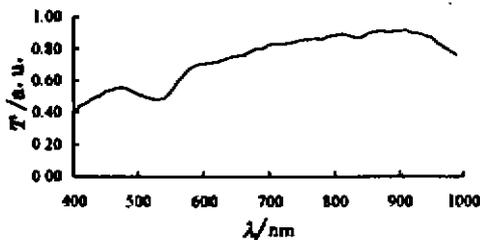


图 3 蓝宝石光纤透射谱  
Fig. 3 Transmittance spectrum  
of a sapphire fiber

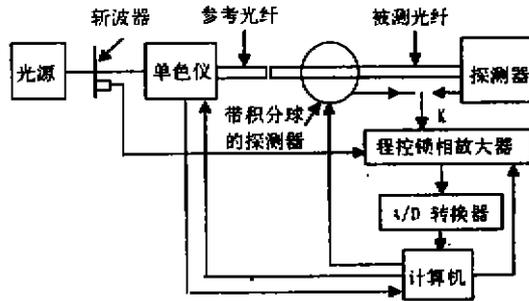


图 2 单晶光纤损耗测量仪框图  
Fig. 2 Diagram of loss spectrum  
test set for crystal fiber

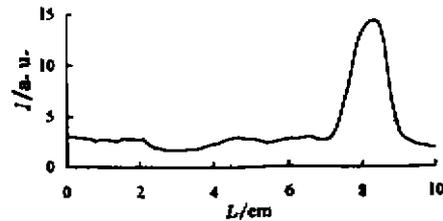


图 4 蓝宝石光纤散射位置谱  
Fig. 4 Scattering loss as a function  
of position for a sapphire fiber

### 3 蓝宝石单晶光纤的应用

蓝宝石单晶光纤主要的应用领域为高温传感和近红外激光传输,目前我们研究重点为高温传感技术中的应用。

图 5 为我们采用的双波长蓝宝石单晶光纤高温传感器的结构图,在蓝宝石单晶光纤的一端涂覆一层高发射率的感温介质并经高温烧结形成一微型的光纤感温腔(热传感头)。当热传感头深入到热源时光纤感温腔与周围环境迅速达到热平衡,感温腔辐射的光信号经蓝宝石光纤传输,所用的蓝宝石单晶光纤直径一般为  $600\sim 1000\mu\text{m}$ ,长为  $10\sim 50\text{cm}$ ,因此需要用一根低温石英粗光纤或光纤束与蓝宝石单晶光纤耦接以传输能量,辐射光信号经透镜分束通过两选定的干涉滤光片(中心波长分别为  $820\text{nm}$  和  $940\text{nm}$ ,带宽为  $30\text{nm}$ )后由硅光电池探测接收。当感温腔的轴向尺寸足够小时,则可以认为处于热平衡状态下的感温腔是一等温腔。另外蓝宝石单晶的吸收系数在很宽的温度范围内为  $10^{-3}\sim 10^{-4}/\text{cm}$ <sup>[6]</sup>,而光纤芯径只有数百  $\mu\text{m}$ ,所以感温腔内表面每次反射和发射过程中吸收很小,即对热辐射而言腔内蓝宝石单晶光纤接近全透明,因此光纤感温腔内表面的热辐射相当于空腔的热辐射,我们合理地把蓝宝石光纤感温腔看作一等温圆柱腔。对圆柱腔的热辐射特性已经有很多人作了研究<sup>[7]</sup>,

理论分析与实验均表明,腔的长度与直径之比越大,腔体的表观发射率越接近于1,一般来说,当腔长与直径之比大于10时,其热辐射就非常接近黑体辐射, $\epsilon$ 值接近于1,而且是一个稳定的值,因此可以把蓝宝石单晶光纤感温腔看作为一光纤黑体腔.例:对于通常用的直径为 $700\mu\text{m}$ 的蓝宝石光纤,光纤感温腔的长度应大于 $7\text{mm}$ ,这个尺寸一般已能满足实际应用场合对探头空间分辨率的要求.由于探头的表观发射率 $\epsilon$ 接近于1,而且是一个稳定的值,因此蓝宝石光纤传感器具有很高的测温精度.

图6为蓝宝石光纤感温腔 $820\text{nm}$ 波段(带宽为 $30\text{nm}$ )辐射强度随温度变化实验测定值,它与理论值一致.利用所生长的蓝宝石单晶光纤研制成了基于8098单片机的双波长蓝宝石单晶光纤高温计,其测温范围为 $800\sim 1700^\circ\text{C}$ ,测温精度为 $0.2\%$ ( $1000^\circ\text{C}$ 时)<sup>[8]</sup>.考虑到当前的实际可选用条件,采用了标准双铂铑作为温度标定的比较标准,经过近百小时试用,在 $1200^\circ\text{C}$ 以下长期工作其稳定度在 $2^\circ\text{C}$ 以内,在更高温度的下的稳定性情况尚在考察之中.仪器已实际应用于高温高速热气流温度测量、中频石英管炉温度监测等常规热电偶难以使用或使用不好的场合.

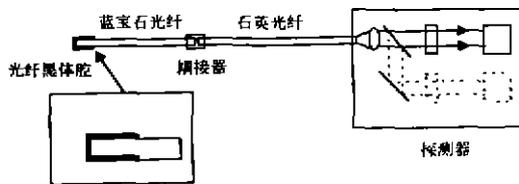


图5 蓝宝石光纤高温计  
Fig. 5 A high-temperature sapphire optical fiber thermometer.

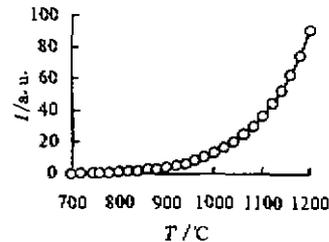


图6 辐射强度随温度的变化  
Fig. 6 Temperature dependence of radiance intensity

### 参考文献

- 1 Amick H. *Reserch & Development*, 1986, 64(8)
- 2 Jundt D H, Fejer M M, Byer R L. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 55(21):2170
- 3 Feiglson R S, Kway W L, Route R K. *Optical Engineering*, 1985, 24:1102
- 4 陈溪芳等. *人工晶体学报*, 1990, 19(3), 235
- 5 丁祖昌等. *高技术通讯*, 1995, 5(2):36
- 6 Dils R R. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(3):1198
- 7 Quimm T J. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1967, 118:1105
- 8 Ye L, Shen Y. *Proc. SPIE-Fiber Optic Sensors*, 1996, 2895:393

## GROWTH AND OPTICAL PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL SAPPHIRE FIBERS FOR A HIGH TEMPERATURE SENSOR AND POWER TRANSMISSION\*

Ye Linhua

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Sapphire single-crystal fibers (diameter 200~1000 $\mu\text{m}$ , length 10~50cm) were grown by the laser-heated pedestal growth method. The transmission and scattering losses for such kinds of fibers were analyzed and measured. The results show that the sapphire fibers have excellent optical transmission properties in visible and near infrared region of the spectrum, and can be used for medical transmission systems and high-temperature-sensor applications.

**Key words** sapphire single-crystal fiber, optical fiber sensor, infrared power transmission.

---

\* The project supported by the National High Technology (863) Foundation and National Natural Science Foundation of China