

# 传输大功率激光的导光纤维

上海化工学院玻璃专业光纤组

## 提 要

研制了热熔端部的导光纤维束，可用于传输几十瓦的  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光。

## 一、原 理

激光导光纤维分为主动式和被动式两大类。主动式激光纤维就是一台纤维激光器，纤维既是激光工作物质，也是激光传输介质，由 Snitzer<sup>[1]</sup> 在 1961 年制成，并在以后制成了实用的装置<sup>[2]</sup>，这类激光器是脉冲式，且能量不能做得很大。另一类被动式即是光学纤维，只能作为激光传输介质，本身不发出激光。根据纤维的结构不同，它又可分成纤维束和单纤维两种。

导光纤维用于传输自然光与传输大功率激光的主要区别是：

1. 传输激光的导光纤维要能承受激光的高功率密度而不发生端面及纤维内部的破坏；

2. 在长时间激光照射下纤维的导光性能不降低；

3. 由于激光的功率较大，因此要求导光纤维传导损耗比一般导光纤维的损耗低得多，才能不产生发热、烧坏等各种问题；

4. 在利用激光的高能量密度作为切割、焊接等应用场合时，传导激光的导光纤维还要求出射的激光具有小的发散度，以保证有足够的功率密度；

5. 由于激光的方向性好，传导激光的导光纤维还必须使激光注入方便、效率高。

一般常用的导光纤维束绝大多数用光学玻璃纤维制成，两端用粘合剂粘固后磨光抛光。绝大多数光学玻璃对常用激光器的激光是透明的（波长为 10.6 微米的  $\text{CO}_2$  激光除外）。因此可以用光学玻璃作为激光导光纤维的芯皮料。不过一般光学玻璃的光吸收系数都大于  $0.1\% \text{厘米}^{-1}$ ，这种玻璃制成的导光纤维束的透过率很少超过  $30\% \text{米}^{-1}$ ，所以传输大功率激光的光学纤维的芯料对某波长激光的光吸收应当在  $0.1\% \text{厘米}^{-1}$  以下。

一般导光纤维不能用来传输大功率激光，其主要原因是端面用环氧树脂一类粘合剂粘合，纤维间的孔隙大，孔隙中粘合剂填充其间（图 1）。这种导光束中导光面积只占整个束截面积的 60~70%。当激光照射这种

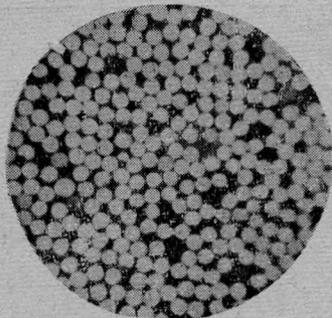


图 1 环氧粘结的导光纤维束端面的显微照相

纤维束端面时,使粘合剂破坏炭化,继而形成激光能量吸收中心。在破坏点上形成发热中心,使温度上升到数百度至上千度,致使导光纤维端面熔化,破坏了芯皮界面,使导光纤维失去导光能力。一般环氧粘结的导光束在1~2瓦的连续激光的照射下就足以破坏。

针对这种情况我们研制了一种热熔端部的导光纤维束,导光纤维束的两端部不用任何粘合剂,而将纤维的端部加热至纤维软化温度,加压熔合在一起。这样制得的导光纤维束截面上导光部分所占的比例提高到90%左右(图2),导光能力大大提高,更重要的是纤维间没有空隙,不会嵌入任何杂质,使每平方厘米承受激光的功率密度可达数百瓦~数千瓦。

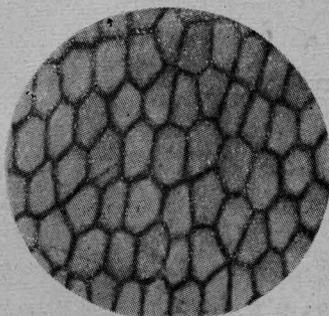


图2 热熔端部的显微照相(纤维间的黑线是光学纤维的包皮层)

## 二、制造工艺

### 1. 材料

导光纤维是由导光芯与外包皮构成的,芯料的折射率高,皮料的折射率低,光在芯皮界面上多次全反射,从纤维入端传输到出端。

芯料的折射率  $n_2$  与皮料的折射率  $n_1$  的差值决定了导光纤维能接受多大孔径角范围内的光,  $\Delta n$  愈大,纤维的受光角愈大,而出射光的出射角也愈大。孔径角  $\theta$  与  $n$  有如下关系:

$$n_0 \sin \theta = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

$n_0$ ——与纤维入端接触介质的折射率,通常是空气,  $n_0=1$ 。

一般的导光纤维希望  $\theta$  大,以提高受光能力,增加亮度。而激光的发散度很小,以毫弧度计,因此传导激光的导光纤维的孔径角不必要求很大,激光就能注入,同时却要求出射的激光具有相对小的发散度,所以传输激光的导光纤维的芯皮料折射率差以稍小为合适。

热熔端部的导光束在拉丝后还要经过再一次加热过程,要求芯皮料玻璃的析晶性能优良,芯皮料的化学相容性特别好,才不致在热压过程中析晶,或芯皮界面产生乳化、气泡等缺陷,以致导光纤维丧失导光能力。对热熔纤维来说,这是非常重要的。

纤维的热熔端部是靠纤维的外包皮层熔合在一起的,显然,希望芯玻璃的软化温度高于皮玻璃或二者接近,以免芯皮界面在热压过程中产生太大的变形而破坏,并可使热熔部分的纤维之间的空隙全部排除。

最后,和一般导光纤维一样,要求皮玻璃的热膨胀系数小于芯玻璃,以使纤维有较高的强度。由此可见,热熔纤维束对材料的要求是比较苛刻的。

我们有选择地研制了二组玻璃,都制成了热熔端部的纤维束,其性能如表1。

表 1

组别	玻璃牌号	折射率 $n_D$	软化温度 $T_f(^{\circ}\text{C})$	热膨胀系数 $\alpha \times 10^{-7}$ (20~200 $^{\circ}\text{C}$ )	光吸收系数 (%厘米 $^{-1}$ )	数值孔径	孔径角
I	芯 LaK <sub>13</sub>	1.6934	660	91(0~200 $^{\circ}\text{C}$ )	0.24	0.74	47°32'
	皮 14#	1.5220	608	84			
II	芯 F <sub>626/356</sub>	1.6258	473	91.3	0.05	0.27	15°23'
	皮 1#	1.6031	476	74			

第一组皮玻璃的软化温度低于芯玻璃的软化温度, 热熔的纤维束端面中每根纤维芯仍保持圆形(图 3), 但不易使纤维间无孔隙, 且芯玻璃的光吸收系数比第二组芯玻璃高得多。所以最后选定了第二组芯皮玻璃。

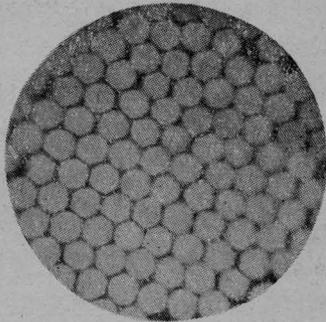


图 3

## 2. 拉丝、熔压、装配

将芯玻璃和皮玻璃分别置于铂双坩埚内外层中, 于  $780^{\circ}\text{C}$  左右拉成 80 微米左右的导光纤, 卷于直径  $\phi 350$  毫米的圆筒上, 控制拉丝机速度及卷取时间, 使每筒丝有一致的数量。将拉好的丝截断, 摊成 1100 毫米长的一束, 挂置于稳定的水流之下使纤维间的交错理直, 待水干后, 纤维束端面包上一层厚度为 0.2 毫米的铝箔, 铝箔的长度应比热熔模具长 1 厘米左右, 以保护热熔端部与未熔压部分的过渡区的纤维不致断裂, 且可使纤维束内外受力较为均匀。然后将纤维束包铝箔的端部放入垫有云母片的压模中, 压模结构筒图如图 4。最后置于熔压炉中。

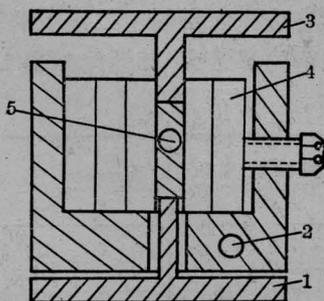


图 4 热熔端部模压筒图

1—下压块; 2—热电偶; 3—上压块;  
4—垫块; 5—导光纤束

熔压制度如下: 二小时升温至  $450^{\circ}\text{C}$ , 预压 2 公斤/厘米<sup>2</sup>, 缓慢升温至  $495^{\circ}\text{C}$ , 保温十分钟后, 平稳加压, 于五分钟内压到预定深度, 随时注意炉内导光束的光度变化, 此时压力约 10 公斤/厘米<sup>2</sup>。持压三分钟后闭电自然冷却, 约 5~6 小时降至  $50^{\circ}\text{C}$  左右。从炉中取出导光束及模具, 从模具中仔细取出导光束, 严格防止撞击及弯折以防折断纤维。导光束另一端如法熔压后, 将中间未熔压部分用乙醇浸软, 烘干后涂以 0# 二硫化钼润滑剂, 装入金属软管中, 两端用氧化铜耐高温无机粘合剂粘固。无机粘合剂配方如下: 正磷酸加 5% 无水乙醇, 与适量  $\text{Cu}_2\text{O}$  粉末调成糊状。粘合后用红外灯烘固, 固化后纤维束端面用金刚砂及二氧化锗研磨及抛光。

## 三、导光束性能及应用

热熔端部导光纤束有  $\square 4 \times 4$  毫米和  $\bigcirc d=4$  毫米二种, 金属软管外径  $\phi 10$  毫米, 最小曲率直径  $R=50$  毫米, 长度  $<1000$  毫米, 透过率  $40\% \text{米}^{-1}$  (未计算端面反射损失)。承受功率:  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光 ( $\lambda=1.06$  微米) 不小于 500 瓦/厘米<sup>2</sup>。纤维芯玻璃的透光曲线如图 5。

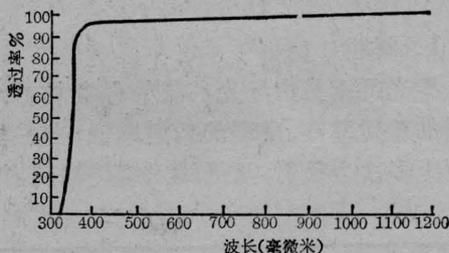


图 5 F626/356 玻璃的透光曲线

由此可见热熔端部的导光纤束可以传输氙离子(4880 埃)、氩-氟(6328 埃)、红宝石(6943 埃)、氟离子(6472 埃)、砷化镓(9020 埃)及钽玻璃、掺钕钇铝石榴石激光, 传输功率可达几十瓦, 它具有柔软、与激光耦合简单、

使用方便可靠等优点,在激光器输出光斑较大或模式不良时也能有较好的注入效率。导光束由许多根纤维一起传输激光功率,其中少数断丝不会对输出功率产生重大影响。在使用了一段时间后断丝增多时,还可以选择断丝较少的部位注入激光继续使用。

导光束已应用于  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光治疗皮肤、口腔部位的血管瘤、淋巴管瘤,获得了显著的效果<sup>[3,4]</sup>。医生反映导光纤维束轻便灵活,易于消毒,在五官等部位治疗较导光关节方便。

热熔部位的导光纤维的主要缺点是透过率低,功率损耗大。实践证明它适宜于传输

50瓦以下的激光,而不能用来传输百瓦级的激光。其次,纤维束使激光输出的发散角增大,热熔束的输出激光发散角在  $15^\circ$  以上,而且输出端中每根纤维是一个发光点,因此完全不能用光学系统聚焦成很细的点。这种纤维束只宜于用作较低功率下的照射、烧灼而不能用作切割、焊接。

### 参 考 资 料

- [1] E. Snitzer; *Phys. Rev.*, **7**, 444(1961).
- [2] C. Hermas; (*Annals of the New York Academy of Sciences*) Vol. 168, Art. 3.
- [3] 《激光》,1975, **2**, No. 4, 8.
- [4] 东方仪表厂,上海科技报,1976.7.2.

## $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体光学均匀性的改进

中国科学院上海光机所晶体组

用引上法生长的掺杂氧化物晶体,通常都具有核心的缺陷<sup>[1,2]</sup>。由于核心中杂质的浓度较高,而引起的化学应力直接影响了材料的光学均匀性。关于核心形成的机理及其消除方法已有人从理论和生长工艺上进行了探讨<sup>[2~4]</sup>,其中[5,6]对  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  和 GGG 晶体中核心的研究较为详细。关于  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体中的核心, M. J. Weber<sup>[7]</sup> 及 P. Korozk<sup>[8]</sup> 等人有一些简单的介绍,至于核心对材料光学均匀性的影响及在生长工艺上的消除都还未见有报导。消除核心对获取大直径光学均匀的  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  激光棒也有一定的实际意义,本文介绍了生长  $b$  轴  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体的热场条件以及在消除  $b$  轴、 $c$  轴晶体中的核心,改善  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体光学均匀性时得到的一些实验结果。

### 一、实验装置及条件

资料[9]说明只有在一定的热场条件下

生长晶体,才能克服  $c$  轴  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体的严重开裂及孪晶现象。而  $b$  轴  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体则可以在图1所示的热场条件下生长。图中曲线表示气液界面处温度梯度为  $\sim 40^\circ\text{C}/\text{毫米}$ ,在液面以上 25 毫米内温度梯度为

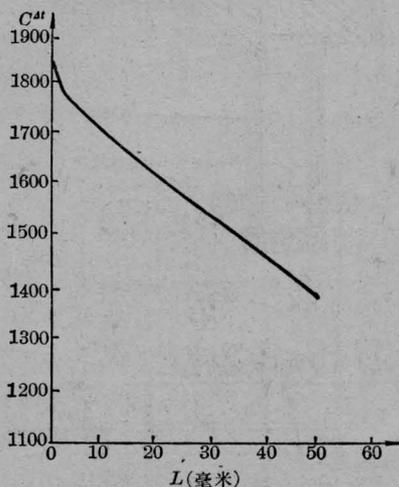


图1 生长  $b$  轴  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$  晶体的炉内温度分布