

# 亚毫米波毫米波玻璃镀金波导管

熊守仁 苏锦文 史国良

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文计算了应用于光泵远红外波导激光器的玻璃介质和金属空心圆柱波导管的衰减常数；比较了玻璃介质和不同材料的金属圆柱波导管亚毫米波和短毫米波的传输特性。采用特殊工艺研制了玻璃镀金波导管，应用光泵远红外激光器谱线测试了波导管的传输特性。玻璃镀金波导管性能优于其它波导管。

## 一、引 言

光泵远红外激光器由于工作波段向长波区发展，腔内衍射损耗增大，激光增益下降。Hodges 等人<sup>[1]</sup>首次在光泵远红外激光器中采用波导谐振腔。远红外波导激光器具有结构紧凑、稳定性好，效率高、有利于长波长工作等优点。至今人们通常采用玻璃或石英介质波导管以及黄铜波导管。但在远红外波段，介质波导管的传输损耗很大，黄铜波导管的内壁加工比较困难，性能往往不够理想。研制适用于远红外波段的波导管是研究光泵远红外波导激光器的重要内容。同时性能好的亚毫米波毫米波波导管在很多涉及远红外传输的实验中也有重要应用。在有限的实验空间内，难以装置复杂的光学系统，而采用波导管传输能使实验装置简化并可获得最高的远红外传输效率。Ohlmann 等人<sup>[2]</sup>曾经制作过镀银波导管，但这种镀银波导管的远红外透过率很低，性能并不好。作者在玻璃管内壁镀金，制作玻璃镀金波导管并获得成功。

## 二、空心圆柱波导管衰减常数的计算和分析

Marcàtili 和 Schmetlzer<sup>[3]</sup>的理论计算表明，当满足  $2A \gg \lambda$  条件时 ( $2A$  是波导管直径， $\lambda$  为波长)，空心圆柱介质波导管中存在三种电磁场分布，即横电模  $TE_{0m}$ ，横磁模  $TM_{0m}$  及混合模  $EH_{nm}$ 。其波导传输衰减常数  $\alpha_{nm}$  可表示为

---

本文 1986 年 1 月 23 日收到。

$$\alpha_{nm} = \left( \frac{u_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{A^3} \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\nu^2 - 1}} & \text{TE}_{0m} (n=0); \\ \frac{\nu^2}{\sqrt{\nu^2 - 1}} & \text{TM}_{0m} (n=0); \\ \frac{1}{2} (\nu^2 + 1) & \text{EH}_{nm} (n \neq 0); \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $u_{nm}$  是  $(n-1)$  阶贝塞尔函数的第  $m$  个根;  $\lambda$  是波长;  $A$  为波导管半径;  $\nu$  为波导管的复折射率。对于大多数玻璃介质,  $\nu \approx 1.5$ 。由式(1)可以证明其最低损耗模是  $\text{EH}_{11}$  模。

Kneubühl 和 Affolter<sup>[4]</sup> 讨论了空心圆柱金属波导管的红外和亚毫米波传输特性。证明在金属圆柱波导管中低损耗模仅是  $\text{TE}_{0m}$  模, 其衰减常数为

$$\alpha_{\text{TE}_{0m}} = \left( \frac{\pi \epsilon_0 c}{\sigma A^2 \lambda} \right)^{1/2} \left( \frac{U'_{0m} \lambda}{2\pi A} \right)^2, \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_0$  为自由空间电容率;  $c$  为光速;  $\sigma$  为金属的电导率;  $U'_{0m}$  为零阶贝塞尔函数的一阶导数  $J'_n(u')$  的第  $m$  个不为零的根。

我们以黄铜为例, 计算了金属波导管亚毫米波和短毫米波  $\text{TE}_{0m}$  模的衰减常数以及玻

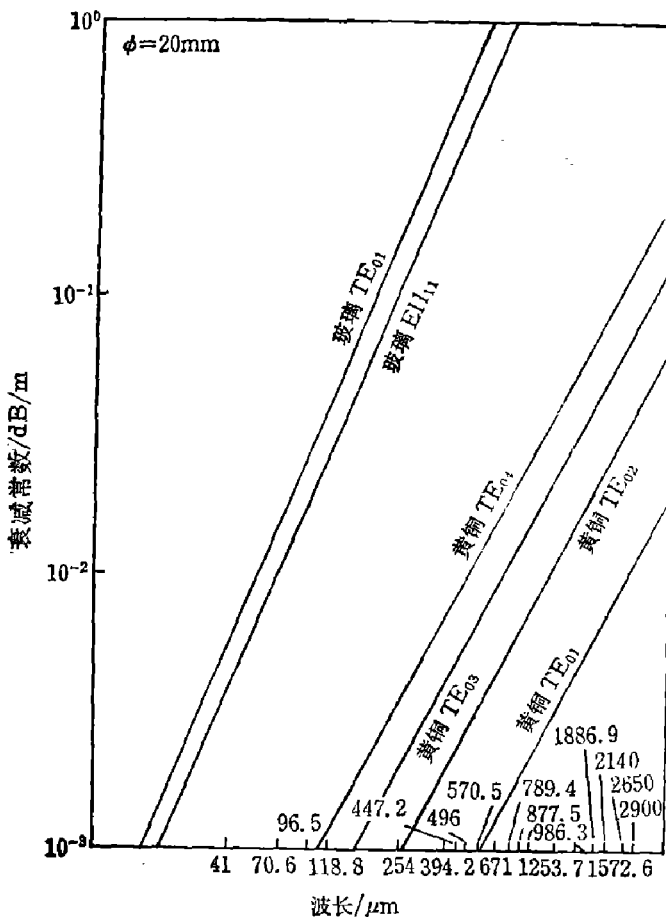


图1 空心圆柱波导管最低损耗模衰减常数和波长的关系

Fig. 1 The attenuation constants of the lowest loss mode in hollow cylindrical waveguides as a function of wavelength

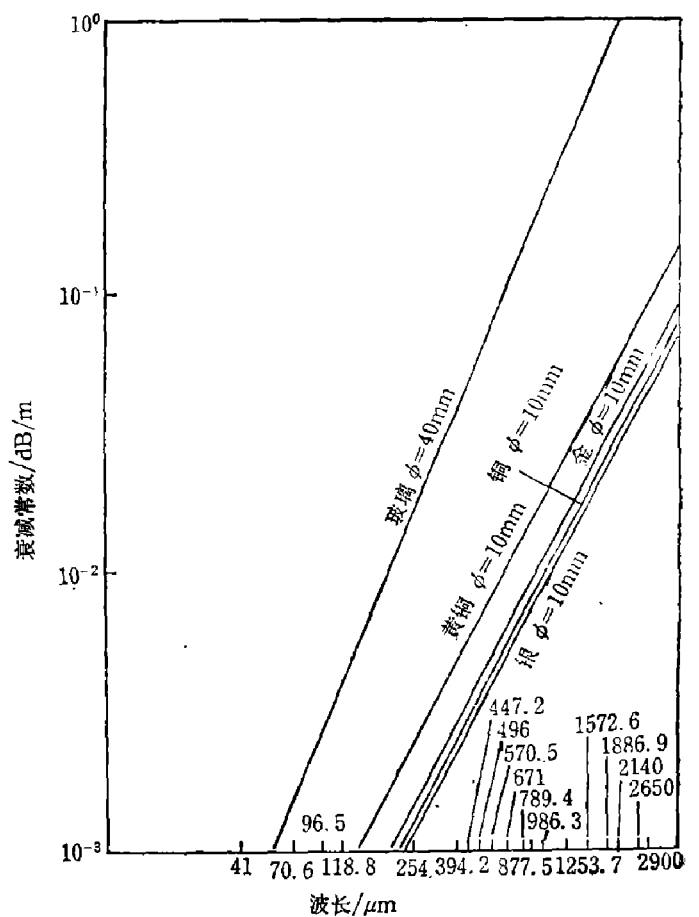


图2 金属圆柱波导管  $\text{TE}_{01}$  模及玻璃  $\text{EH}_{11}$  模衰减常数与波长的关系

Fig. 2 The attenuation constants of  $\text{TE}_{01}$  mode in metal cylindrical waveguides and of  $\text{EH}_{11}$  mode in glass waveguide as a function of wavelength

璃介质波导管最低损耗模  $\text{EH}_{11}$  模的衰减常数(图1)。由图1可见,黄铜波导管  $\text{TE}_{01}$  模的衰减常数比玻璃介质波导管  $\text{EH}_{11}$  模衰减常数小二个数量级以上。

我们对几种不同材料的金属波导管  $\text{TE}_{01}$  模衰减常数进行了计算,其结果见图2。当波导管直径相同时,黄铜波导管的衰减最大;银波导管的衰减最小,且与金波导管及铜波导管的衰减常数比较接近;说明金、银、铜三者都是制作波导管的较好材料。但是,由于银和铜的化学稳定性不好,其实际性能差。因此,只有金为制作波导管的理想材料。

图3是对不同直径的金波导管的  $\text{TE}_{01}$  模衰减常数的计算结果。由图3可见,直径40mm的金波导管的衰减常数比直径10mm的金波导管衰减常数小二个数量级。在实际应用中必须综合考虑波导管传输损耗、激光谐振腔的模体积以及激活气体分子的消激发诸因素,选择适当的波导管直径。

在正入射条件下,金属表面趋肤深度为<sup>[5]</sup>

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{4\pi\sigma_0\omega}}; \quad (3)$$

式中,  $c$  是光速;  $\sigma_0$  是金属的直流电导率;  $\omega$  为光的频率。表1列出亚毫米波和短毫米波谱区金趋肤深度的计算值。

由表1可见,对于波长为3mm,金的趋肤深度是  $1.647 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 。这样的金属厚度,可以应用在玻璃管内壁镀金的方法制作。

表1 金趋肤深度与波长的关系

Table 1 Skin depth of gold as a function of wavelength

$\lambda(\text{mm})$	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$\delta(\mu\text{m})$	$3 \times 10^{-2}$	$6.72 \times 10^{-2}$	$9.51 \times 10^{-2}$	$1.165 \times 10^{-1}$	$1.345 \times 10^{-1}$	$1.504 \times 10^{-1}$	$1.647 \times 10^{-1}$

### 三、玻璃镀金波导管的研制和远红外传输性能的测试

#### 1. 制作原理

玻璃镀金波导管是通过在玻璃管内壁镀制金反射层而制得的。金反射层的形成采用先化学涂复后热处理的方法。涂复金溶液的主要成份是  $\text{Au}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AuCl}_3$  以及树脂类有机化合

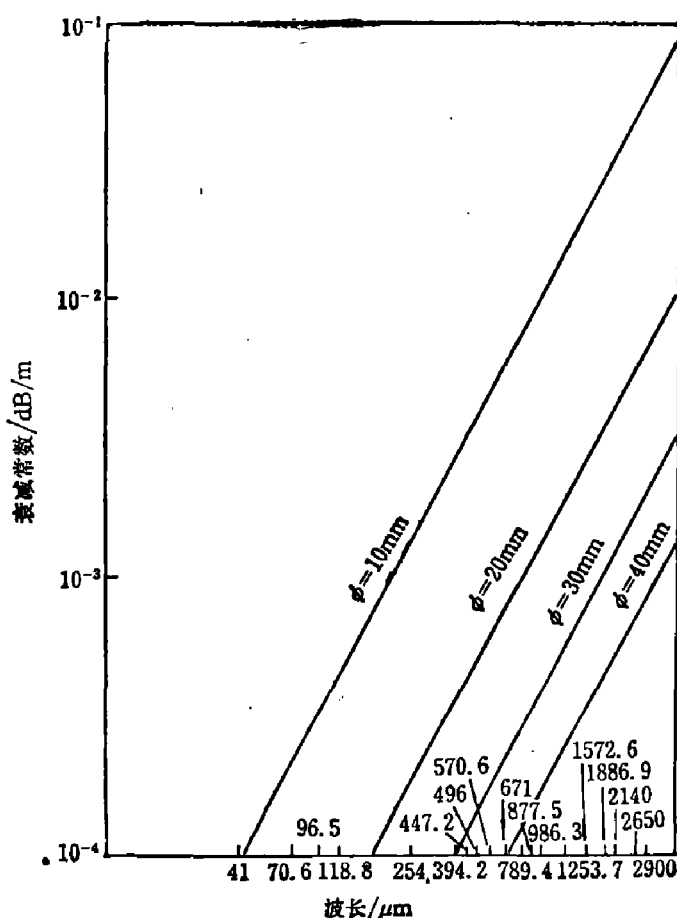
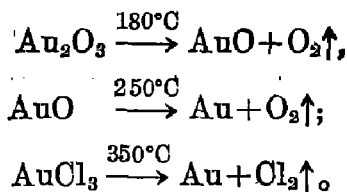


图3 不同直径的金波导管  $\text{TE}_{01}$  模衰减常数与波长的关系

Fig. 3 The attenuation constant of  $\text{TE}_{01}$  mode in gold waveguide with varied diameters as a function of wavelength

物。金化合物在热处理中被还原,反应过程如下:



## 2. 制作工艺

将金溶液均匀地涂布在玻璃管内壁,干燥后形成胶膜。然后将玻璃管均匀地加热。为使化学反应充分并使金层在管壁上有良好的粘结,烧结温度一般控制在  $500^\circ\text{C}$ , 可以获得光亮的金反射层。

## 3. 玻璃镀金波导管远红外传输性能的测试

图 4 是波导管远红外传输性能测试装置示意图。其中光泵远红外激光器为开式腔激光器

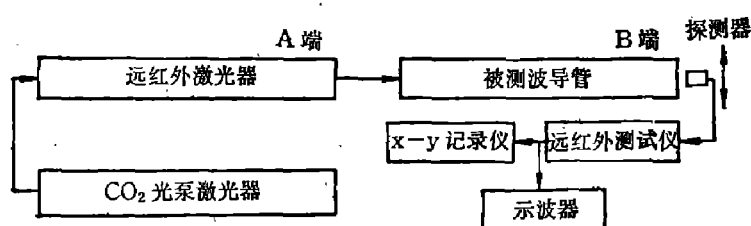


图 4 波导管远红外传输性能测试装置

Fig. 4 Schematic diagram of the measurement equipment for FIR transmission characteristics of waveguides

器<sup>[6]</sup>。测试中在原来基础上增加了提高激光输出稳定性的措施。采用殷钢架固定  $\text{CO}_2$  激光器,远红外激光输出稳定性有较大提高,输出激光功率的漂移小于  $\pm 5\%$ 。 $118.8\ \mu\text{m}$ 、 $447.2\ \mu\text{m}$ 、 $496\ \mu\text{m}$  激光输出功率约为  $10\ \text{mW}$ 。热释电探测器被安放在远红外激光输出窗口(图 4 中位置 A),作横向扫描,测试出

远红外激光输出的强度分布为  $\text{TEM}_{00}$  模,如图 5(a)所示。图 5(b)是热释电探测器在图 4 中位置 B 横向扫描所测得的结果。实验表明,经波导管传输后,远红外激光强度分布仍接近高斯分布。因此,使用接收面直径为  $2\ \text{mm}$  的热释电探测器在远红外激光输出窗口(图 4 中位置 A)或波导管输出端口(图 4 中位置 B)所测得的峰值信号电压可作为远红外激光输出功率的相对值。另一方面,由于测试中波导管端口直接靠近远红外输出窗口,因此远红外激

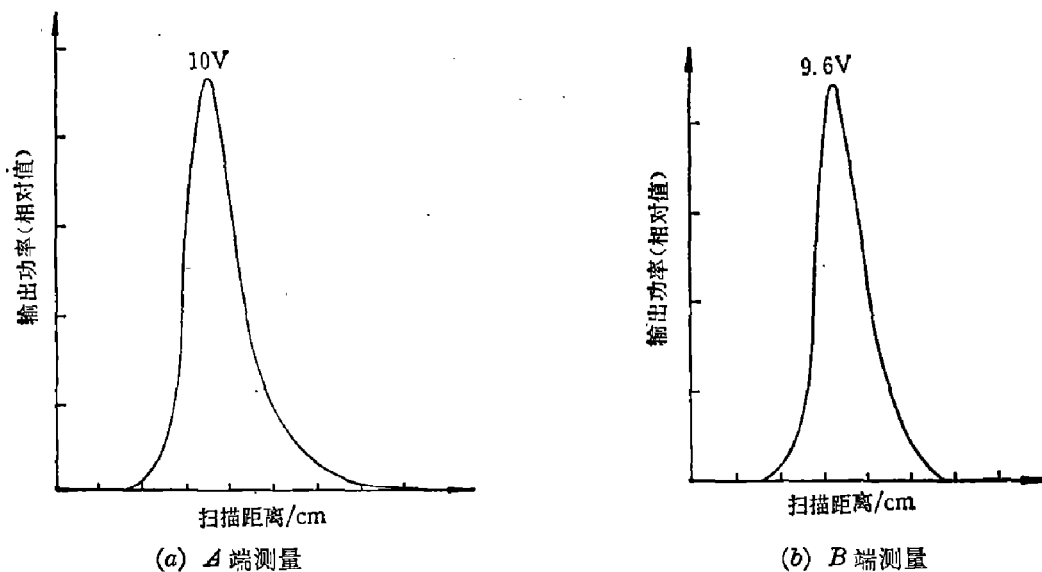


图 5  $118.8\ \mu\text{m}$  谱线的横向强度分布

Fig. 5 The transverse intensity profile of  $118.8\ \mu\text{m}$  line measured

光输出 TEM<sub>00</sub> 模与波导管的输入耦合损耗很小;同时,热释电探测器又靠近波导管输出端面,因此经波导管传输的远红外激光与热释电探测器的耦合损耗也很小。由此可以认为整个波导管传输性能的测试中,耦合损耗所带来的测试误差是很小的。

## 四、实验结果

1. 应用 6J-A 型干涉显微镜测量了镀金波导管镀金层平面样品,厚度  $>0.3\mu\text{m}$ 。由上述电磁波正入射条件下的计算可知,本工艺制得的金层厚度已能充分满足远红外波导传输中金表面趋肤深度的要求,表明玻璃介质波导管内壁经镀金以后已经实现金属化,成为金属波导管。

2. 金反射层经 JF-1 型红外高反射率测量仪<sup>[7]</sup>测试,在  $9\sim 11\mu\text{m}$  红外谱区,反射率  $>72\%$ 。化学涂复和高温烧结的金反射层在红外谱区的反射率虽然低于真空镀膜工艺的金反射层,但在光泵远红外波导激光器中已足以将衍射到管壁上的绝大部分泵光束反射回腔内,极大地提高了泵浦吸收效率,对提高激光增益极为有利<sup>[8]</sup>。

3. 表 2 是几种波导管对远红外辐射透过率的测试结果。由表 2 可见,直径 40 mm 的玻璃镀金波导管的远红外透过率接近 100%,表明制作工艺是比较成功的。又由于玻璃镀金波导管具有好的化学稳定性和低热导率等优点,因而其性能将优于其它波导管。

表 2 波导管远红外透过率的测试结果

Table 2 Far infrared transmission of several waveguides

材 料	直径(cm)	长度(cm)	电导率 $\sigma \times 10^{17} (\Omega \text{cm})^{-1}$	波长( $\mu\text{m}$ )	透过率(%)
镀 金	4	123	4.06	447.2	~100
镀 金	2.5	123	4.06	118.8	96
镀 金	2.5	170	4.06	496	92
黄铜管 <sup>[2]</sup>	1.1	122	1.42	140	60
镀 银 <sup>[2]</sup>	1.1	70	5.58	140	58
玻 璃	4	123	—	447.2	25
玻 璃	2.5	170	—	496	17.5

## 五、结 语

玻璃镀金波导管在光泵远红外波导激光器中得到了成功的应用,获得了波长 1.25 mm 的远红外激光谱线<sup>[8]</sup>,同时也在气体光声吸收池以及远红外激光生物实验中得到应用。

此外,本文介绍的玻璃镀金波导管兼备优良的远红外传输特性和良好的绝热性能,为一般金属波导管所不可能达到。因此,它是低温和深低温条件下远红外传输实验的理想光学部件。

致谢——本所余和昌同志帮助建立温控实验装置;陶凤翔同志提供金层反射率测试,作者在此仅致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Hodges D. T. and Hartwick T. S., *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 5:252.
- [2] Ohlmann B. C., Richard P. L. and Tinkham M., *J. Opt. Soc. Amer.*, **48**(1958), 531.
- [3] Marcatili E. A. J. and Schmeltzer, *The Bell System Technical Journal*, (1964), July, 1783.
- [4] Kneubühl F. K. and Affolter E., *Infrared and Millimeter Waves*, Academic Press New York San Francisco London Vol 1, Chapter. **6**, (1979), 235.
- [5] Givens M. P., *Optical Properties of Metals*, in *Solid State Physics*, Vol. 6, Acad. Press, New York, 1958, 313.
- [6] 苏锦文等, 红外研究, **3**(1984), 1:26.
- [7] 徐世秋等, 红外研究, **3**(1984), 1:5.
- [8] 苏锦文等, 红外研究, **5**.(1986). 3: 167.

## A SUB-MM AND MM WAVEGUIDE MADE OF GOLD-COATED GLASS TUBE

XIONG SHOUREN, SU JINWEN, SHI GUOLIANG  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

Attenuation constants of metals and glass hollow cylindrical waveguides for optically pumped far infrared waveguide lasers are calculated by using existing theories. A new way to build a metal hollow cylindrical waveguide for sub-mm and mm waves is given by coating gold on the inner-wall of the glass tube. The far infrared transmission characteristics of this waveguide are investigated at wavelengths of  $118.8\mu\text{m}$ ,  $447.2\mu\text{m}$  and  $496\mu\text{m}$ . The performance of this waveguide is better than that of a brass one.