

# 波导激光器波导管精度的分析和测量

王明常 王梧成 陈杏凤

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 介绍了对波导管的精度进行的分析以及测量、检验的方法。给出了对波导管弯曲损耗的要求。推导出波导轴弯曲的横向偏离量和曲率的关系式, 给出检测的结果。

## Analysis and measurement of waveguide tube precision of the waveguide lasers

Wang Mingchang Wang Wucheng Cheng Xinfeng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** Waveguide tube is the core of waveguide lasers. Analysis, measurement and inspection of the waveguide tube precision are described in this paper. Requirements for minimizing the waveguide axis bending are given. The relation between the transverse deviation for the axial bending and the curvature radius of the waveguide is derived and the results of the measurement are given.

### 一、引言

波导管是波导激光器的核心。它不仅起放电管的作用, 还与反射镜一起构成谐振腔。波导激光器采用细长的波导管, 使辐射在里面掠射传播。在中空介质波导管中, 虽然管内的气体折射率小于管壁材料的折射率, 不满足全内反射条件, 但还能激励起传输损耗最低, 也是我们最感兴趣的  $\text{EH}_{11}$  波导模, 它具有自由空间  $\text{TEM}_{00}$  模的场分布。所以, 波导激光器输出功率、模式、效率等参量都和波导管的精度有关。在波导管的几何尺寸(管径、长度和壁厚等)选定后, 则上述参量主要和波导管轴线的弯曲和内径的径向变化大小

有关。下面介绍的是我们在这方面的研究结果。

### 二、精度分析

波导激光器的损耗包括波导模的传输损耗、耦合损耗、输出耦合损耗以及波导管弯曲的附加传输损耗等。在我们选定管材(pyrex 玻璃的折射率  $\nu=1.5$ )、管半径( $a=0.73$  毫米)及管长( $l=13$  厘米)的情况下, 根据中空介质直波导  $\text{EH}_{11}$  波导模的传输损耗公式:

$$\alpha' = \left( \frac{u_{11}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \frac{\nu^2 + 1}{2\sqrt{\nu^2 - 1}}$$

收稿日期: 1981年2月10日。

式中  $u_{11}$  是贝塞尔函数第一个根, 其值等于 2.405。代入上述给定数值, 则求得单位长度的传输损耗系数为:

$$\alpha' = 0.53 \text{ 分贝/米}$$

对于我们的放电管, 单程传输损耗为:

$$\alpha \approx 0.07 \text{ 分贝}$$

耦合损耗与腔片至波导口的距离  $d$  有关。[1]求得在  $d$  等于 3 毫米时, 一端的耦合损耗约为 0.024 分贝, 两端加起来的耦合损耗就为:

$$\alpha_c = 0.05 \text{ 分贝}$$

激光器振荡条件是增益必须大于损耗。对于 pyrex 玻璃波导激光器, 已测量了典型情况下的增益数值<sup>[2]</sup>, 单程增益约为 1 分贝。当输出端透过率分别采用  $T=10\%$  和  $T=15\%$  时, 由输出耦合引起的(有用)损耗分别为 0.4 分贝和 0.7 分贝。在这种情况下, 波导管弯曲的附加传输损耗  $\alpha_b$  不得超过 0.2 分贝, 才能保证激光的振荡。所以将 0.2 分贝规定为临界值, 作为挑选波导管的标准。对于高质量的波导激光器, 要求  $\alpha_b$  更小, 起码应和其他几项(无用)损耗同一数量级。我们选定和耦合损耗数值相当, 即  $\alpha_b$  小于 0.05 分贝。

根据 E. A. J. Marcatili 的理论分析<sup>[3]</sup>, 波导管轴线弯曲的曲率半径为  $R$  时, 引起的附加传输损耗为

$$\alpha_b = \frac{a^3}{R^2 \lambda^2} V_{nm}(\nu) \quad (1)$$

对于  $\text{EH}_{11}$  波导模

$$V_{11}(\nu) = 15.5(1 + 0.246 \cos 2\theta_0)$$

在  $\cos 2\theta_0 = 1$  时,  $V_{11}(\nu)_{\max} = 19.3$ 。由此得出最大弯曲附加传输损耗为

$$\alpha_b = 19.3 \frac{a^3}{R^2 \lambda^2} \quad (2)$$

下面推导波导管轴弯曲的  $R$  与横向偏离量  $X$  的关系,  $X$  是实际测量值。

长度为  $l$  的波导管, 假定其轴线弯曲如图 1 所示, 由直角三角形的关系有

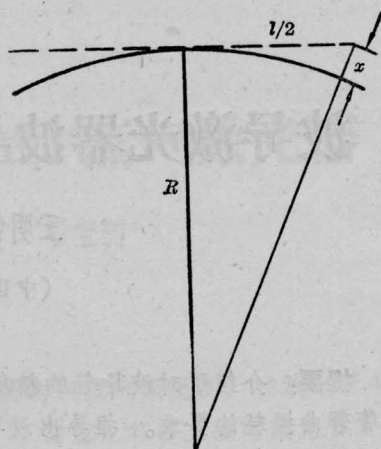


图 1 波导管轴线的弯曲曲率半径  $R$  和横向偏离量  $X$  的关系

$$(X + R)^2 = R^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

解得:  $X = R \left[ -1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2R}\right)^2} \right]$

物理上要求上式取正根, 并当  $l \ll 2R$  时, 有

$$X \approx R \left[ -1 + \left(1 + \frac{l^2}{2(2R)^2}\right) \right] = \frac{l^2}{8R} \quad (3)$$

式(3)表明  $X$  反比于  $R$ 。

由上述分析, 正常使用的波导管要求  $\alpha_b < 0.05$  分贝, 极限情况为  $\alpha_{b\max} < 0.2$  分贝。再根据已知的  $a$  值和  $\lambda$  值, 由式(2)便可

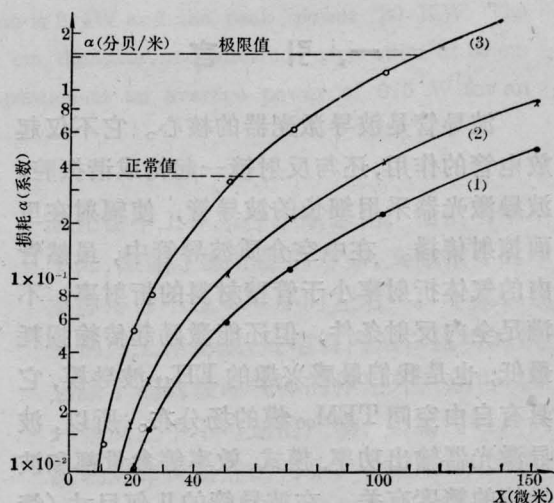


图 2

- (1)  $a=0.73$ ,  $l=200$  毫米; (2)  $a=0.50$ ,  $l=130$  毫米;  
(3)  $a=0.73$ ,  $l=130$  毫米

求得相应的  $R$  值。再利用式(3)就求得允许的偏离量  $X$  值,正常值和极限值在我们选定的波导管尺寸条件下,分别对应于  $x=50$  微米和  $x_{\max}=106$  微米。不同的长度和半径,对波导弯曲的要求是不同的。图 2 给出不同半径  $a$  和长度  $l$  时,波导管轴线的横向偏离量  $X$  引起的相应附加传输损耗。

### 三、检测方法和有关数据

利用万能工具显微镜可以检测出微米级的轴向变化量。将玻璃毛细管放在万能工具显微镜的工作平台上,仔细地调节目镜的焦距,利用透射光先确定出两根表征波导管内径的特征线。移动平台,沿轴线方向( $x$ )轴不同距离处测量出特征线的  $y_1$  和  $y_2$  值(图 3)。

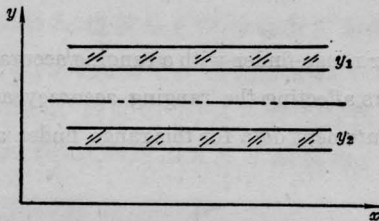


图 3 在万能工具显微镜的平台上检测波导管两垂直方向数值的示意图

将测量出的数值在方格纸上做图。由图 3 可知,波导管内径  $d=y_1-y_2$ ,波导轴线的纵向距离

$$C = \frac{1}{2}(y_1 + y_2)。$$

画出  $d$ 、 $c$  随  $x$  的变化曲线,如图 4 所示。量出曲线  $c$  至平均值(即理想的直波导管)的垂直距离,它就是波导轴弯曲的横向偏离量  $X$ 。

按照上述要求选取  $\Delta C < 50$  微米,  $\Delta d < 10$  微米的波导毛细管,再用内调焦平行光管做最后的筛选。万能工具显微镜只能在圆周的一个方向上观测,平行光管却可以在圆周

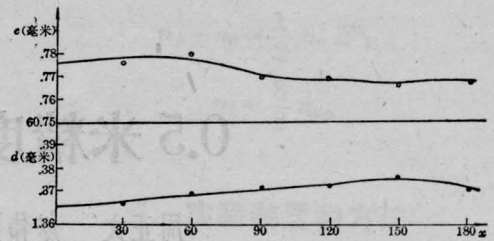


图 4 毛细管内径和轴线弯曲的测量数据

$x$	0	30	60	90
$y_1$	61.450	61.450	61.457	61.447
$y_2$	60.086	60.086	60.088	60.075
内径 $d$	1.364	1.364	1.369	1.372
弯曲 $c$	60.768	60.768	60.772	60.761
$x$	120	150	180	
$y_1$	61.447	61.447	61.445	
$y_2$	60.075	60.070	60.074	
内径 $d$	1.372	1.377	1.371	
弯曲 $c$	60.761	60.758	60.759	

的全方位观测。

调整内调焦平行光管光轴与波导管轴线同心,并且平行。改变焦距,使波导管不同距离的圆截面成象在平行光管视场中,如果是理想的直波导,则视场中只出现一系列直径不同的同心圆。在存在弯曲的情况下,各圆截面不再同心。这种测量的精度  $< 100$  微米,熟练的工作者可看出  $< 50$  微米的变化。

在波导毛细管的烧制过程中,也需要不断地做这种检测,以监视和校正因热加工而引起的形变。

### 参 考 文 献

- [1] 王明常等;《激光》,1980,7, No. 4, 19~22。
- [2] M. B. Klein et al.: IEEE J. Quant. Electr., 1975, QE-11, 609~615。
- [3] E. A. J. Marcatili et al.; Bell. Syst. Tech. J., 1964, 43, 1783~1809。