

# 制作 40 毫瓦 He-Ne 激光器的工艺问题

梁 世 伟

(三机部三〇三研究所)

He-Ne 激光器由三个重要部分组成: 一个封装激光工作物质 (He、Ne 气体等) 的放电毛细管; 激励电源为获得激光提供能源; 由反射镜和稳定的机械结构组成的谐振腔。一般希望获得 TEM<sub>00</sub> 模有最大的输出功率, 兼有较好的稳定性, 但是, He-Ne 激光器是多种工艺的综合结果, 所以, 在不同条件下需要解决的重点也不相同。本文介绍制作 TEM<sub>00</sub> 模 40 毫瓦全外腔 He-Ne 激光器的有关问题, 并侧重于毛细管校直工艺。

## 一、放电管设计中的一些考虑

我们是从谐振腔出发来确定激光管几何尺寸的。实验证明<sup>[1]</sup>激光输出功率近似与模体积成正比。激光在腔内的模体积大体如图 1 所示。Rody 和 Kogelnik<sup>[2]</sup>计算了光斑尺寸  $w_1$  和  $w_2$ 。

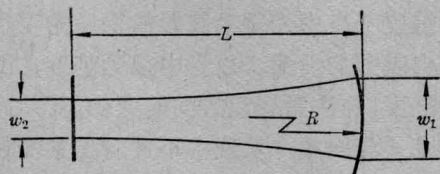


图 1 平凹腔内高斯光束的轮廓

引入谐振腔参数  $\beta = R/L$  来表示腔的特性, 腔长  $L$  一定,  $\beta$  与  $R$  成正比。要功率大, 宜采用大  $R$  的长半径腔,  $\beta$  太大接近平面腔时腔不稳定, 调腔困难。一般  $\beta = 3.5 \sim 4.5$  是

许可的。在我们设计的放电管长  $l = 98$  厘米; 总长  $L = 1.12$  米;  $R = 5$  米;  $\beta = 4.4$ ;  $w_1 = 0.75$  毫米;  $w_2 = 0.69$  毫米。

$w_1$  与  $w_2$  与管径无关, 一般衍射损耗由放电管孔径决定<sup>[3]</sup>, 当 TEM<sub>00</sub> 模衍射损耗有合理的低值时, 孔径<sup>[4]</sup>  $d = 0.33w$  (厘米)。可求出  $d_{1\text{计算}} = 2.5$  毫米,  $d_{2\text{计算}} = 2.3$  毫米; 实际使用  $d_1 = 2.6$  毫米,  $d_2 = 2.4$  毫米; 当  $d_1 = 2.7$  毫米时出现轮胎模。实验证明<sup>[4]</sup>使用光阑有孔径可调的优点, 但对 TEM<sub>00</sub> 模输出不利, 要避免使用。毛细管有粗细或有弯曲, 产生类似光阑的情形, 我们称它为“光阑效应”。

放电管充 <sup>3</sup>He 和 <sup>22</sup>Ne, <sup>3</sup>He 能使功率提高 20% 左右, <sup>22</sup>Ne 效果不显著。充气总压力  $P$ <sup>[3, 5]</sup> 有关系  $Pd = 2.9 \sim 5$ ; 最佳工作电流<sup>[5, 6]</sup>  $I_1 = 70d$  (毫安);  $I_2 = 3.5 + 1.5d^2$  (毫安)。  $I_2$  中  $d$  单位为毫米。根据我们试验, 一米激光器在抑制红外振荡较好时  $Pd = 4$  与  $I_1$  是较适合, 反之取  $Pd = 5$  与  $I_2$ 。

Smith<sup>[7]</sup> 给出横单模多频输出功率计算公式

$$P = 2 \left( \frac{\pi}{5} \right) \left( \frac{d}{2} \right)^2 A W_0 G_m \left( 1 - \sqrt{\frac{a}{G_m}} \right)^2$$

可求出输出功率为  $P_{\text{计算}} = 42.5$  毫瓦 ( $\pm 10\%$ ), 激光器实际输出经国家计量科学研究院鉴定为  $P_{\text{实际}} = 41$  毫瓦。所用平面全反镜反射率 99.5%; 输出镜透射率 3.4%; 非均匀磁场较

收稿日期: 1978年7月17日。

充分地抑制 3.39 微米红外振荡。

## 二、放电毛细管的直度、直径与校直

放电管是激光器的心脏，放电管孔径又是决定激光器其他很多参数的一个重要参数，放电管弯曲妨碍光线通过，小孔径毛细管对弯曲又很敏感。

为解决直度问题，需要了解玻璃管的特性和掌握校直技术，下文给出必要的结果。

### 1. 毛细管的几何形状

玻璃毛细管是从软玻璃料中拉制出来的，因而存在管子的弯曲、扭转和内外直径不一致等缺陷；由于熔料不均匀更加重了内壁的凹凸，严重地影响激光器的功率输出。

毛细管弯扭特点大体可用理想的悬垂线弯曲加以扭转某个角度来描述。图 2 示出悬垂线弯曲(a)和它被扭转 90°(b)、180°(c)的三种特例。要观察这一现象可选椭圆形内孔的毛细管，注意两端面孔的长轴方向的变化



图 2 毛细管弯扭状态示例

即可。根据这一特点对纯悬垂线弯曲(a)，可使用三个可调支架毛细管进行顶直，在弯曲不严重时效果较好，其余情况效果较差。

对毛细管直度的要求存在一个相对范围。例如一米毛细管有 0.5 毫米的弯曲已不能选用，将它截成十段，每段弯曲仅有 0.05 毫米。因此制作小 He-Ne 激光器只要精选毛细管仍可达到较好结果。

毛细管外径不均匀性会影响某些校直方法和检测方法，如热躺直等。表 1 是外径测量示例。

毛细管内孔的几何形状和沿长度方向孔径的变化是重要的。将管截成十段，顺次测量内径，其结果如图 3 所示。由于能测到最

表 1 毛细管外径测量结果

测量位置 (毫米)		0	100	200	300	400	500
外 径 (毫米)	I	9.46	9.50	9.44	9.30	9.22	9.16
	II	9.44	9.50	9.62	9.48	9.34	9.56
测量位置 (毫米)		600	700	800	900	1000	
外 径 (毫米)	I	9.12	9.18	9.10	9.12	9.08	
	II	9.62	9.62	9.64	9.40	9.22	

大偏差值的几率是小的，而弯曲又加重了对光学直径的影响，因此最后的光学直径将比

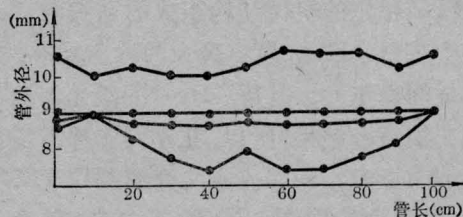


图 3 毛细管内径测量曲线

测得的几何直径小得多。这与获得高功率激光器相矛盾，因此必须对拉制毛细管进行再加工。

### 2. 毛细管的内应力

内应力不能直观地看出来，它的分布又十分复杂和不均匀，每支毛细管情况都不一样，因此精确测量是没有必要的，只要知道它的作用，克服它所产生的不利影响。

现以三支直径不同的毛细管为例，测量不同温度下自由悬垂毛细管的挠度的变化来反映内应力的情况。以管中部为基准，测两端的挠度，并注意挠起方向的变化。其结果列于表 3、4 和图 4。从表中不难看出直径较小的毛细管在较低温度下就开始弯曲，应力释放较早；不同管的上端(悬吊处)的挠度比下端大；当温度到达 640°C 时毛细管开始伸长，即开始软化。从图 4 表明随温度升高挠起方向变化很大，这是拉制毛细管中扭应力释放的结果。因此不适合的退火工艺对未消去应



表3 内应力试验毛细管的特征测量

项目 管号	长度 (毫米)	外径(毫米)		内径(毫米)		原始挠度 (毫米)	
		上端	下端	上端	下端	上端	下端
III	1173	11.4	10.8	3.60	3.30	0.45	<0.1
IV	1227	10.1	9.4	2.85	2.60	0.6	<0.1
V	1188	7.8	7.3	1.10	1.00	<0.1	0.2

表4 内应力释放过程中挠度的变化

项目 管号	500°C		550°C		600°C		640°C		长度
	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	
IV	0.65	0.3	0.9	0.75	3.4	0.7	1.9	0.5	1174
V	0.6	0.3	1.9	1.0	1.8	0.4	1.0	<0.1	1229
VI	0.2	0.4	2.3	0.8	2.5	<0.1	1.0	<0.1	1192

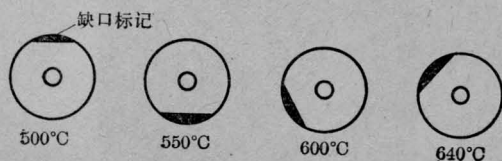


图4 毛细管加热后挠度方向的变化

力的毛细管是危险的。

点温计测点燃放电管外表，当放电电流为26毫安，外径为10毫米的外表温度为107°C。除热膨胀外，温升无疑还会导致内应力的变化，从而增加输出功率和光束漂移的因素。

### 3. 直毛细管的简易选择方法

在大量使用选购毛细管时，采用图5所示滚动粗选法，弯曲严重的有较大的跳动，立即可以舍去，工作效率高。

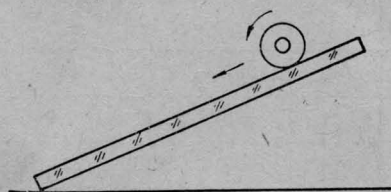


图5 滚动选管方法

粗选后要进行精选。熟练掌握同心环方法可以达到很高的准确性。从管一端观察另一端外的亮处，可看到孔径粗细不一所反映的圆环，转动管子时，如果不直，圆环与通光亮点作不同心移动。用图6所示的挡光套松紧合适地装在毛细管上，挡住端面入射的杂散光，使观察清晰和准确。这种方法熟练后观察是比较快的。

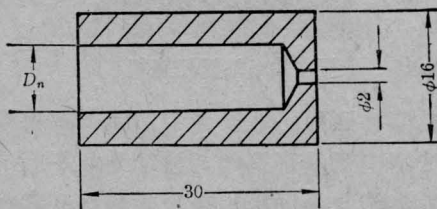


图6

毛细管研磨后需用激光束通过，观察通过后产生足够多的衍射环的方法<sup>[8]</sup>，这是比较准确的。如果管子再经抛光，仍可用同心环法。

### 4. 毛细管的校直加工

#### (1) 手工研磨方法<sup>[8,10]</sup>

铜丝研磨是取比毛细管孔径小0.1毫米左右的紫铜丝，将中间10~20毫米涂面腊后用稀硝酸将其余部分直径减小0.2毫米，以后用砣码拉直，加304#刚玉粉研磨，如图7所示，它能减小内径粗细不一的现象，但不能将毛细管磨直。



图7 铜丝研磨法

钢丝研磨法是将铜丝换成钢丝，钢丝直径是均匀的，用砣码悬垂后，再用喷灯烧两次，将它预校直后供研磨用。它的缺点是毛细管喇叭口大；圆形孔径磨成“棱形”，不能磨直。

#### (2) 毛细管校直机

校直机是为了克服手工研磨的缺陷，为了进行真空收缩校直和磨后抛光而设计的。

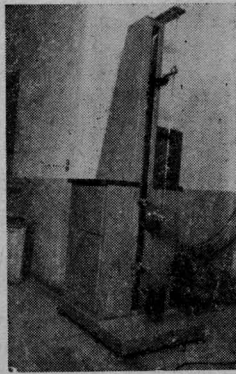


图8 毛细管校直机

图8是实物照片。在设计中用调节底座螺钉的方法解决了垂直钢丝与滑动导轨平行的问题；毛细管与传动机构采用软联接问题；传动机构均用无级调速。初步试验表明它作研磨用是可行的，并在制作41毫瓦激光器中使用了它。

### (3) 毛细管的热校直

热躺直是将毛细管置于直的V形槽中，加热到硬化点随炉冷却。由于毛细管外径不均匀使试验失败。后来试验成功热吊直工艺，将毛细管下端挂100~150克重物，垂直悬吊在温区均匀的退火炉中，悬吊方式如图9所示，加热到软化点，控制它的伸长量在

150~250毫米，炉冷后截去两端弯曲部分，即得吊直了的毛细管。热校直装置照片图

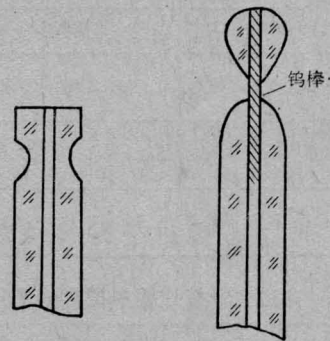


图9 毛细管吊装方法

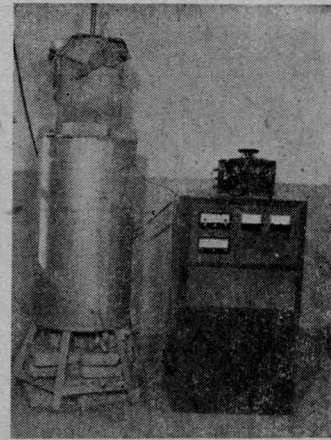


图10 毛细管热校直装置

表5 毛细管热校直记录

编号	原长 (毫米)	原上孔 (毫米)	原下孔 (毫米)	温度 (°C)	校后长 (毫米)	总伸长 (毫米)	上截量 (毫米)	上孔径 (毫米)	下截量 (毫米)	下孔径 (毫米)
78-09	1130	2.95	2.60	682	1277	147	110	2.55	120	2.4
78-11	1130	3.00	2.80	683	1358	228	160	2.50	150	2.55 ~2.65

表6 毛细管分段伸长测量记录

编号	原长 (毫米)													
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1130	
78-09	0	110	221	337	457	576	693	805	916	1027	1138	1247	1277	
每段伸长	0	10	11	16	20	19	17	12	11	11	11	9		
78-11	0	114	235	360	491	621	747	867	984	1099	1213	1324	1358	
每段伸长	0	14	21	25	31	30	26	20	17	15	14	11	4	



10. 表 5、6 是试验记录。分段伸长量的测量可间接反映孔径收缩量和退火炉温度的分布情况。热吊直新工艺的优点是能将任意弯曲的毛细管校直；校直后毛细管处于完全退火状态；一次可处理数支毛细管，操作简便；与校直机配合使用更为理想。

### 三、清洁和抑制红外振荡等问题

用功率较大的 He-Ne 激光束做清洁度等的检查是很有益的。在光束侧面逆着出光方向观察室内尘埃，光束亮或有大量闪亮颗粒时不宜粘贴窗片；将窗片以布儒斯特角置放光束中，根据表面亮度可判别它是否擦干净了；测量在远处的反射点可检定窗面的平行性；在接近反射或透射方向观察置于光束中的反射镜，可粗略地判断镜的优劣；如果光束很强，测量加反射镜前后的功率，可估计反射镜的透过率；在激光管制造的工艺过程中检查每道工序后的清洁情况，可以协助找出窗片污染的原因。由于清洁问题是比较明显的，只要认真就能解决。

要获得高功率必须使用与激光器输出匹配的反射镜，图 11 是文献[9]的实验结果。

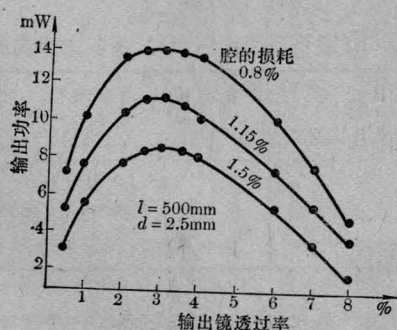


图 11 反射镜透过率与输出功率的关系

一米 He-Ne 激光器的 3.39 微米振荡是严重的。我们用非均匀磁场抑制红外振荡，并作了不同气压、气体比、工作电流与有无非均匀磁场的综合试验，取得较好效果。

电泳现象的利用。因 He、Ne 气体电离电位高，激光管放电时杂气电离并被赶到阴

极附近，因此在老化结束时立即将系统铝电极作阴极，激光管阴极改为阳极，放电 15 分钟后，在放电的同时进行下台操作，烧封时放出的杂气和玻璃分解产物随放电被带入系统。只是在高压下带电作业，必须十分注意安全。

### 四、全外腔激光器的机械结构

气体激光器谐振腔需要考虑角度和长度稳定性。He-Ne 激光的功率和方向的飘移主要来自腔角度变化。短时间内外界的振动，长时间内激光器发热引起的温度梯度，由反射镜曲率等所决定的腔结构，都会严重影响角度稳定性。此外放电管轴线与腔轴线之间的变化虽不影响腔的稳定性，但影响输出功率。

在外腔管中应使腔与激光器座的外壳分开。考虑到热效应腔设计应使腔体横向热梯度分布均匀对称。对称受热只考虑腔长，腔角度基本不变，但实际中完全均匀对称受热是不存在的，因此要设法减小腔的受热量，如增设热辐射挡板，增设定向对流通风，以加快散热。图 12 便是根据这些原则设计的腔结构

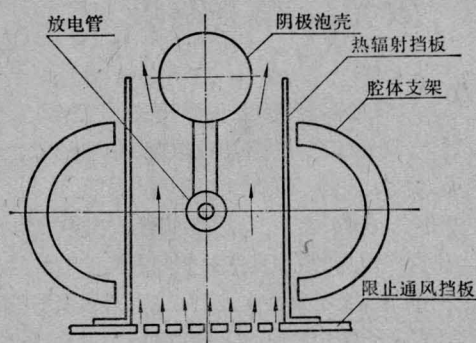


图 12 一种对称布置腔结构原理图

原理图。图中毛细管在腔体中心，热辐射挡板兼起定向通风作用。同轴式激光管对热稳定性更有利。

腔体材料的导热系数和热膨胀系数是两个重要参数。在长激光器中常用铝而不用殷钢。

(下转第 47 页)

$$\begin{aligned}
 \text{因 } S_1 &= \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} R^2 \cos^3 \varphi \, d\varphi \, d\theta \\
 &= \frac{16}{3} \pi R^2
 \end{aligned}$$

又因  $S_2 = 2\pi RH$  (该功率计  $H = 9.5$  毫米), 当反射镜的小孔  $\phi = 4$  毫米 (即半径  $r = 2$  毫米) 时, 接收体腔内表面总吸收率  $K$  应由下式近似地求得:

$$K = \left( \frac{16}{3} R^2 + 4RH - r^2 \right) / \left( \frac{16}{3} R^2 + 4RH \right) \approx 99.43\%$$

激光以热能的形式经传热导管传至散热器, 传热导管两端出现温度梯度, 同时在热偶的冷端和热端间就有一温差电动势产生, 温差电动势的大小正比于激光功率的大小。若在相同的条件下, 不让激光进入接收头, 而是在电标定丝两端通电加热, 使热偶两端输出的温差电动势与激光照射时输出的温差电动势大小相同, 这时电标定丝所消耗的电功率 ( $W_E$ ) 就等于入射激光的功率 ( $W_L$ )。

改变加在电标定丝两端的电压 ( $V$ ), 就会得到一组相对应的温差电动势数据, 若以显示器的读数为横坐标, 以电功率  $W_E = V^2/R$  的大小为纵坐标作图, 便可得到一条电标定曲线。在测量连续波激光功率时, 纵坐

(上接 61 第页)

一般取腔体的长高比为 10:1; 其刚性是可以令人满意的了。要注意刚性与热稳定性的区别, 前者是在受外力作用下表现出来的, 而热稳定与受热情况、导热性和膨胀性有关, 与刚性无关。

反射镜调节机构要求达到很高的角精度, 结构松动是不行的。对于商品采用粗调与精调相结合的机构, 在水平和垂直方向可调为好。

采用三个顶直调节支架对保证毛细管在安装中的直线性是有益的。鉴于放电管与腔

标就表示激光功率 ( $W_L$ )。

### 三、讨 论

1. 该功率计除用于测量 10.6 微米的连续波  $\text{CO}_2$  激光器输出功率外, 还可用来粗略测量 0.1~20 瓦的其它波段连续波激光器的输出功率。

2. 如果使用衰减器, 可以扩大测量的上限。

3. 该功率计的上升时间为 30 秒, 下降时间为 19 秒, 热平衡时间为 37 秒。要想缩短热平衡时间, 在制作时首先应减轻  $\omega$  形接收头的质量; 其次还要缩短传热导管的长度, 增大其横切面积, 即缩短热端至冷端的热程和增大传热速度; 第三要从设计上改善散热器的散热效果。

### 参 考 文 献

- [1] 邱明新, 《激光》, 1, No. 2, 22~29 (1974).
- [2] D. A. Jennings *et al.*; *Rev. Sci. Instr.*, 41, No.4, 565~567(1970).
- [3] 上灯一厂等, 《激光》, 4, No. 2, 25~31 (1977).
- [4] 稻场文男等, レーザーハンドブック, 299~311 (1973).
- [5] J. H. Jacob *et al.*: *Rev. Sci. Instr.*, 44, No. 4, 471~474(1974).

体相对位置的重要性, 支架应与腔体连在一起。对旁阴极激光管的阴极泡壳需要适当的支撑, 以保证使用和运输的安全。

### 参 考 文 献

- [1] *American Journal of Physics*, 37, No. 3, March (1969).
- [2] D. C. Sinclair; *App. Opt.*, No. 3, 1067 (1964).
- [3] 《Laser handbook》, Vol 1, 599~621 (1972).
- [4] 《Opt.-electronics》, 4, 21~30, (1972) 译文集.
- [5] 《激光技术》, 天津大学, (1972).
- [6] “WSB 型氦-氖激光器”, 北京科仪厂 (1976).
- [7] P. W. Smith; *IEEE. J. Quan. Elect.*, QE-2, 77~79 (1966).
- [8] “半内腔式 Ne-Ne 激光器”, 浙江大学光学系 (1973).