

# 关于内腔 He-Ne 激光器工艺中 若干问题的讨论

北京电子所 505 组

He-Ne 激光器是自一九六〇年问世以来为人们研究最多应用最广泛的一种气体激光器。目前,国内许多单位进行了研究和生产。下面仅就我们制作长 40 厘米、输出 6328Å 的 He-Ne 内腔管过程中碰到的一些问题,进行粗浅的讨论。

## 1. 放电毛细管的选取和配置

从激光振荡的机理考虑,毛细管的长度和内径是极为重要的两个几何参数。因为放电毛细管的内部是起增益放大作用的正柱区所在的区域,其间有如下关系<sup>[1]</sup>:

$$G_m = 3.0 \times 10^{-4} l / d \quad (1)$$

式中  $G_m$  为每程最大增益,  $l$  为有效放电长度,亦即毛细管长度,  $d$  为毛细管内径,均以厘米计。式(1)说明  $G_m \propto l$ , 所以无论对于单模管还是多模管,为在一定总长下取得最大输出功率,应尽可能将毛细管取得长一些。在总长 40 厘米的内腔管中,毛细管长约为 30 厘米左右。

从式(1)还可看出,激光器内的增益与管径成反比,但总功率却又与模体积有关,管径过小也会增大衍射损失,故为取得最大总功率,在一定长度的管子上可以找到一个最佳内径。根据经验,总长 40 厘米的内腔管,对于多模管,管径约取为 2 毫米左右;对于单模管,管径约取为 1.4~1.5 毫米

毛细管的内径均匀性、直度和圆度都很重要。因为沿管轴各处内径不均匀,管子弯曲或内孔不圆都将使等离子区得不到充分利用,增大了损耗,降低了增益,因而影响输出功率。这些要求对于想制作 TEM<sub>00</sub> 模(即所谓单模)的激光器来说更显得重要,因为 TEM<sub>00</sub> 模的横向场分布为高斯型<sup>[2]</sup>:

$$E(x, y) = E_0 \frac{W_0}{W} e^{-\rho^2/W^2} \quad (2)$$

式中  $z$  轴为管轴方向,  $E_0$  为管轴处的电场振幅,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  为考察点与管轴之距离,  $W = W(z)$ , 为光束半径,  $W_0 = W(z=0)$ , 光束的横截面为一圆斑。毛细管内壁和出射口处的任何不规则性,不仅使衍射损失增大,同时也使近场输出光束的场分布不规则,影响了模式的光学均匀性,如图 1 所示。

实际上,挑选沿管轴各处孔径尺寸极为一致的毛细管极为困难。通常毛细管孔径总是带有一个锥度,一头大,一头小。幸好,对于平凹结构的谐振腔,高斯光束的轮廓如图 2 所示<sup>[2]</sup>。光束腰部(即光束半径最小的地方)正好落在平镜上,凹镜上的光斑尺寸  $W_1$  总是大于平镜上的光斑尺寸  $W_0$ ,于是我们就可以在制作激光器时将管径大的一端朝向凹镜,管径小的一端朝向平镜。这样就可以既不必增大管径,又不至增加额外的衍射损耗。对于  $L \approx 40$  厘米平凹腔内腔管,因  $W_0 \approx 0.31$  毫米,  $W_1 = 0.41$  毫米,我们挑选毛细管两端的孔径差必须小于 0.1 毫米。

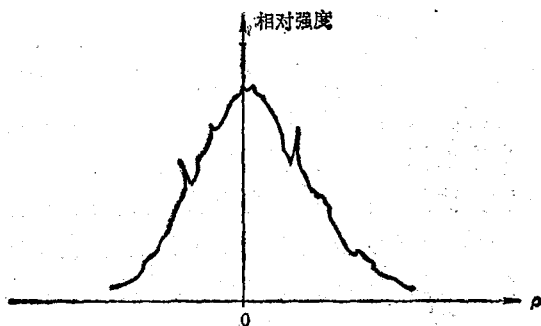


图 1 放电毛细管内壁及出射口处的不规则性造成输出光束的近场分布不规则

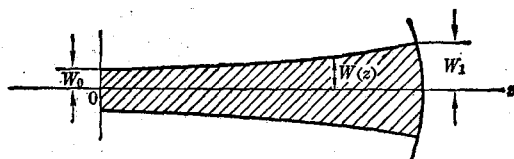


图 2 平凹腔内高斯光束的轮廓

## 2. 端面磨准的检验

在管身上粘附反射镜前必须将管子两端面磨到与放电管轴严格垂直(更要保证两端面互相平行),磨后将平行平晶(平行度优于  $6''$ )分别贴在管子两个端面上用平行光管检验,该平行平晶要有很高的平行度,否则会带来很大的检验误差,如图 3 所示。假定端面已磨得与管轴垂

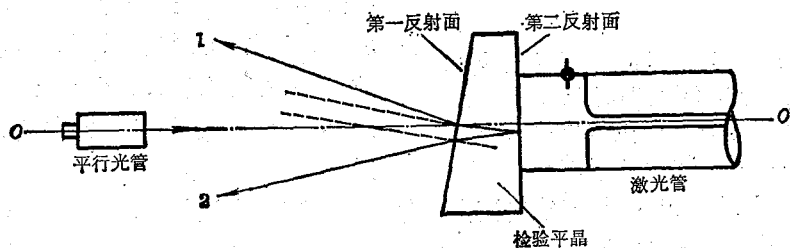


图 3 检验平晶的不平行性带来检验误差

直,若检验平晶的两个反射面高度平行,则仪器叉丝从两个反射面的返回象 1 和 2 应在同一光路  $OO'$  上,并与仪器叉丝本身重合。倘若两反射面不平行,则两个返回象 1 和 2 就不同路而分开,均不与仪器叉丝本身重合。如果选其中任意一个为基准,将管端面磨得使这一返回象与仪器叉丝本身重合,你以为磨准了,实际上端面已经磨偏了。

以上的讨论是指检验近端时的情况,检验远端时就不存在这个问题。

其次,在贴平晶检验前,必须将端面及平晶接触面上的棉花毛及砂粒之类的杂物擦拭干净,否则也会带来很大误差。例如,对于我们的激光管,端面外径  $\sim \phi 30$  毫米,磨管用 304# 金刚砂,平均粒度为  $7\sim 10$  微米,如检验时端面上遗留有一颗砂粒,以其直径 7 微米计,此砂粒使平晶接触面相对于激光管端面的偏斜度达 50 秒。对于接触面上残留的一根棉花毛(直径  $10\sim 15$  微米)甚至会引起 80 秒以上的偏斜!这样的误差对于 He-Ne 激光器的反射镜对准精度来说,是不能容许的。例如,对于平行平面腔,由于角度失调而引起的反射损失达 1%/米,而一般说来为在平行平面腔中获得振荡,要求两平面反射镜的平行度不差于 6 秒<sup>[3]</sup>。

在某种意义上反射镜的平行度比与管轴的垂直度更为重要,因为镜斜使  $TEM_{00}$  模引起的附加损耗比高次模大得多。对无限长条形镜的简化情况所作的数值计算表明<sup>[4]</sup>,费涅耳数  $N=4$  的激光器,相对镜斜为  $\lambda/18$ ,  $TEM_{01}$  模的单程功率损失从约 5% 增加到约 6%,而  $TEM_{00}$  模的单程功率损失则从约 1.3% 增加到约 5.7%。因此欲制作  $TEM_{00}$  模的激光器,尤其需要注意保证平行度的问题。

### 3. 球面镜的同轴

为使凹面镜光轴与毛细管轴同轴，就必须使粘贴凹面镜的端面外圆的圆心落在毛细管轴线上。其方法有三种：一种方法是在磨管时在打算粘凹面镜的一端直接贴上与待粘凹镜同

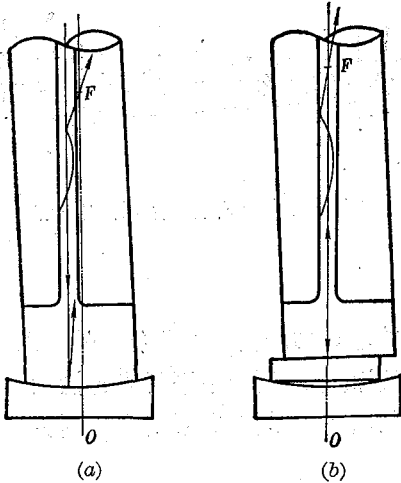


图4 同轴措施之一，同心环原理示意图， $F$  为凹面镜焦点， $FO$  为凹面镜光轴

(a) 未贴同心环时的反射情况；(b) 粘了同心环后的反射情况（两种情况中均假定端面已和管轴垂直）

曲率的标准凹镜进行检验，磨准为止。第二种方法是可在车床设备上将原要粘凹镜的那一端用砂轮片磨外圆或用车刀进行外圆倒角。第三种方法是加贴“同心环”，其原理示于图4中。

### 4. 反射镜的粘贴

粘贴反射镜时首先必须保证端面和反射面的高度清洁（见第二节的讨论）。

我们粘贴反射镜用过两种方法，一种将激光管连同端面镜片夹紧在有根支柱的铁架上粘贴，镜片与铁板之间用约1厘米厚的橡皮垫圈缓冲；另一种是利用平行光管监控粘贴，首先仿照检验端面磨准精度时的操作方法将镜片贴到管端面上，调至又丝象和又丝本身重合，然后粘贴，并在粘结剂硬化前对对准的变动稍作调整。

第一种方法简单易行，一般能给出满意的结果。第二种方法似乎精度稍高，当原玻壳同心度差得不太多时采用这种方法能免掉同心环。不过此法操作麻烦，且对于放在近端（相对于平行光管）粘贴的平面反射镜玻璃基底的两个面的平行度有更高的要求，至少应保证以玻璃基底两个反射面反回的又丝象不至显著分裂开（见第二节的讨论）。如果两个基面的平行度较差，即使从介质膜反射回来的象与仪器又丝本身重合了（即“调准”了），但实质上介质膜反射面却已偏斜了一个角度，此角约为反射镜基面平行度之半（图5）。

在图5中，假定我们通过调轴已使得望远镜内的成象与又丝本身重合，即光路沿着  $OABAO$ ， $OO'$  为望远镜光轴，亦即对准的基准轴，反射镜折射率为  $n$ ，令两基面的不平行角为  $\theta$ ， $NN'$  为基面  $PP'$  的法线， $BB'$  为介质膜反射面的法线，则由几何光学知：

$$\frac{\sin(\theta + \alpha)}{\sin \theta} = n \quad (3)$$

因为  $\theta, \alpha \ll 1^\circ$ ，所以(3)式可用下式近似代替：

$$\frac{\theta + \alpha}{\theta} = n \quad (4)$$

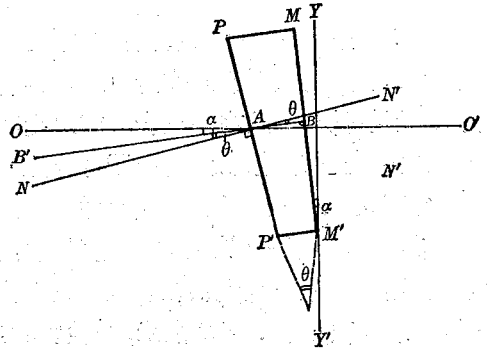


图5 用望远镜监控粘镜时，由于近端反射两基面不平行而造成对准误差，介质膜反射面的偏斜角为  $\alpha \approx \frac{1}{2}\theta$

由此得

$$\alpha = (n-1)\theta \quad (5)$$

对于玻璃  $n \approx 1.5$ , 所以

$$\alpha \approx \frac{1}{2}\theta \quad (6)$$

$\alpha$  角即为介质膜反射面相对于垂直平面  $YY'$  (亦即管子端面) 的偏斜角。

关于粘结剂的加热固化, 以局部加热为好。以前我们采用过放在烘箱中整体加热的方法, 多次发现铁架和玻璃管因热膨胀不一致而松动。现在我们采用局加热法, 对于我们目前所用的  $\phi 30$  毫米的玻璃管端面镜片的粘贴, 取约 0.2 欧的电阻丝(直径  $d \approx 1.6$  毫米)绕成约  $\phi 35 \sim 40$  毫米的两圈, 套在粘结接触面的外缘, 通以 11~13 安培的大电流, 局部加热三小时左右, 加热温度能达  $150 \sim 200^\circ\text{C}$  (粘结剂为 6101# 环氧树脂加顺丁稀二酸酐固化剂, 其重量比为 1:0.3~0.4)。装置如图 6 所示。

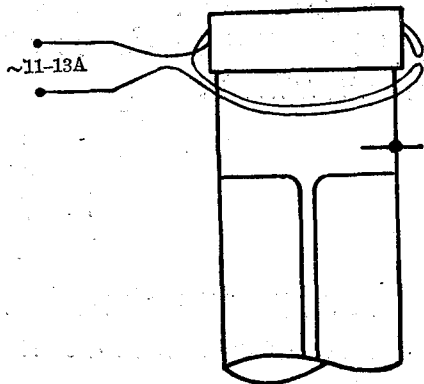


图 6 用电阻环通大电流局部加热

粘结剂涂抹不宜过多。加热过程似乎以逐渐升温较好, 先通以稍小的电流预热一下, 让粘结剂均匀地渗透到接触面上, 半小时后将电流升至规定值。粘结面以不出现气泡为好。

具体的加热电流及环境温度及电阻环与粘接面的相对位置(距离)有关, 而且不同的粘接剂所需固化温度也不一样, 可通过实验确定。

### 5. 阴极材料的选取与处理

由于在 He-Ne 激光器中冷阴极的明显的优越性, 现在绝大多数的 He-Ne 激光器都已采用冷阴极, 对于冷阴极材料的一般要求包括足够的电子发射能力和耐离子轰击(即抗溅射)的能力, 其次要考虑工艺难易及成本高低等问题。

用作冷阴极的材料很多, 有镍(Ni)、铝(Al)、钼(Mo)、镁(Mg)、铍(Be)、钽(Ta)、锆(Zr)等, 最常用的是前三种。这三种材料中, 电子发射能力都不错, 但就耐离子轰击能力来说, 却以经氧化处理后的铝(Al)最好, 成本也低; 只是在工艺处理上稍困难一些, 即焊接较困难, 高频去气温度不易控制(因铝的熔点仅  $660^\circ\text{C}$ )。但权衡以上几个因素, 我们还是选取了铝。铝经氧化处理后在其表面生成一层致密的氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )薄膜, 氧化铝的熔点高达  $1900^\circ\text{C}$ , 它的存在使铝的耐离子轰击能力大大提高, 溅射大大减轻, 而且这层氧化铝薄膜的存在也更加提高了铝的电子发射能力。例如选用一种工业硬铝 LY12 (铝镁合金), 效果很好。

基于上述理由, He-Ne 激光器中的铝冷阴极要经过氧化处理, 方法是激光管在排气台上正式排气前先充入 2 兆左右的氧气或空气(氧气效果好), 以铝阴极作为放电阴极, 进行大电流放电, 电流大小视阴极面积而定, 按比例增大。根据我们的经验, 按 2~3 毫安/厘米<sup>2</sup>比例取值, 放电半小时到一小时就可以了。

氧化处理时要注意两点, 一是放电不能经由玻璃毛细管进行(石英毛细管还可以), 因为玻璃软化点低(硬玻璃仅摄氏 600 多度), 玻璃毛细管经不住这么大的处理电流所产生的高温, 故放电必须以排气台上的另一电极为阳极进行。其二是刚开始放电氧化时宜用较小的电流, 过

一会儿再加大电流,因为一开始铝阴极表面发射能力还不足以提供那么大的氧化电流,可能会导致离子猛烈轰击作过渡焊接的镍杆而造成溅射。起始电流的大小以阴极筒内的放电辉光不伸展到筒外为原则。

铝阴极难于控制高频去气温度(因为烤高频时一见暗红温度就已接近摄氏八、九百度了,铝熔化了)。幸好在氧化处理过程中,铝阴极已经被离子轰击加热到了一个相当高的温度,这实际上就是进行了一次加热去气,氧化处理完后就立即进行排气,再加上以后的几次放电清洗,即使不再对铝阴极进行高频去气,也已能得到满意的去气效果了。在我们的制管过程中,氧气处理后就不再烤高频了。

关于阴极尺寸的选择问题,可参阅资料[5]。原则上是阴极面积随工作电流成比例地扩大,且铝筒的长度随直径的增大而增大。只要空间条件许可,阴极可以尽量做大一些,这对提高管子寿命有好处。

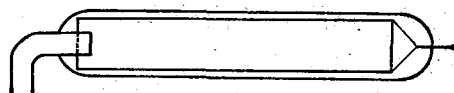


图7 放电玻璃管伸到阴极管内

关于结构问题,为使铝筒内表面均能均匀参与发射电子,应将放电通路上的玻璃管插入到阴极筒内约半到一厘米(图7)。否则容易造成阴极筒端部边缘局部强烈发射,局部因离子猛烈轰击而熔化。

## 6. 排气过程中的问题

外壳可用烘箱或煤气火头去气,毛细管可通过多次放电去气,电流大小视毛细管内径的不同,在30~40毫安范围内取值。

我们曾多次碰到过这样的问题,即制管过程中一切工艺正常,但最后制成的管子却没有激光输出。观察检验光斑的结果说明反射镜对准良好。经多次检查分析,发现是反射镜在管子的排气过程中被污染了,反射镜上形成了一层灰雾膜。这层污染膜有时在第一次放电清洗时就产生了(这时可看到毛细管内出现灰白色辉光,并向两端迅速扩散),这种情况说明毛细管内没有良好清洗干净。有时没有这个现象,但镜片也污染了。发生了这种污染以后,有时将镜片加热一下(比如几十度,不超过100°C),污染物挥发并被抽走了,但有时也挥发不掉。这些现象说明对镜片的这种污染有很大一部分原因是可凝蒸气在镜片上的凝集。我们原先在烘烤去气时为了保护粘接剂免受烘烤温度的影响而在管子两端镜片和粘接部位外缘缠上了湿纱布给以冷却,这样镜片部分相对来说就处在很低的温度,于是别的地方挥发出来而又来不及被抽走的可凝蒸气就凝集到镜片上来了。后来我们改将湿纱布缠到离镜片约一厘米的地方并不断加水冷却,这样最冷的部位就不是镜片而是缠湿纱布地方的管壁了,于是大部分脏物蒸气就不再凝集到镜片上,基本上避免了镜片被污染的问题,但是如果毛细管内很脏的话,那未在预放电时可能难以完全避免这个问题,所以毛细管的清洁就显得特别重要。

如果在整个排气过程中设法使反射镜处在一个几十度的稍高的温度下(比如六、七十度,这不会影响到介质膜和粘接剂,因其耐温均在150°C以上),或许能更彻底地避免这种污染。

至于铝阴极的去气问题,通过氧化处理及几次放电清洗时的大电流轰击,已能比较满意地达到去气的目的了。

对于排气的真空度要求,动态能达 $5 \times 10^{-6}$ 托,短期内静态能保持 $10^{-5}$ 托也就可以了。因

为高纯的 He(或 Ne)气, 纯度均为 99.99%, 这就是说其他杂气的含量相当于  $2 \times 10^{-4}$  托的分压强, 其中有害杂气的含量恐怕达  $10^{-5}$  托分压强的数量级。因此对排气系统提出更高的真空度要求并无必要。

### 7. 红外竞争对 6328Å 输出的影响

在 He-Ne 激光器中, 特定谱线的输出功率取决于原子系统的上、下激光能级的粒子数反转密度。6328Å 谱线系由  $3s_2 - 2p_4$  跃迁产生。由于 3.39 微米谱线 ( $3s_2 - 3p_4$ ) 与 6328Å 共用同一上能级, 3.39 微米的振荡将跟 6328Å 激烈争夺激光上能级的受激原子, 3.39 微米的振荡消耗了 6328Å 跃迁的上能级粒子数, 就使得 6328Å 上的输出功率大为降低。3.39 微米是一条超辐射谱线, 增益可达每米二十几分贝<sup>[3]</sup>, 而 6328Å 只有每米百分之几, 因此 3.39 微米的振荡极易产生。为了提高 6328Å 上的输出功率, 必须抑制 3.39 微米的振荡。玻璃布儒斯特窗片的选择性透射和多层介质膜的选择性反射可起到削弱 3.39 微米振荡的作用, 但仍不足以将其全部抑制掉。例如一片用作布儒斯特窗片的 1.6 毫米厚的  $K_9$  冕玻璃片, 光线以布儒斯特角入射时, 6328Å 的透过率约为 89%, 3.39 微米的透过率约为 35%, 所以即使是 6328Å 的外腔管, 腔内也会存在一些程度不等的 3.39 微米振荡。至于内腔管, 少了一道窗片吸收抑制的关口, 3.39 微米更易在腔内产生振荡。

抑制 3.39 微米谱线的振荡, 可用棱镜的色散效应、甲烷盒吸收或磁场的塞曼效应。对于内腔管, 最简单易行的办法是非均匀轴向磁场抑制法(图 8)。我们在放电毛细管长约 30 厘米的若干管子上作了一些初步的磁场实验, 发现在磁场峰值约为 150~200 高斯的非均匀轴向磁场的作用下, 单模管子的输出功率提高得较为显著, 而对多模管的影响则较为复杂。下表的中一些数据是在几个不同的 6328Å 内腔管上所测得的。管子的有效放电长度都在 28~30 厘米的范围内, 看来当单模管的有效放电长度超过 ~30 厘米时, 红外抑制就显得很必要了。

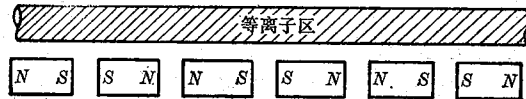


图 8 非均匀轴向磁场抑制 3.39 微米振荡

非均匀轴向磁场对 6328Å 输出的影响

激 光 管	模 式	未 加 磁 场		加 磁 场	
		输出(毫瓦)	电流(毫安)	输出(毫瓦)	电流(毫安)
玻璃管 i	TEM <sub>00</sub>	2.2	5	4.1	9
玻璃管 ii	TEM <sub>00</sub>	2.3	4.5	3.5	7
石英管 iii	TEM <sub>01</sub>	1.35	8	1.7	8
玻璃管 iv(外)	多	2.45	15	2.77	15
玻璃管 v	多	3.3	9	3.1	9
		2.6	15	3.1	15
石英管 vi	多	4.3	12	4.1	12

说明: 第 vi 管后因损坏未作进一步测量; (外)指外腔管, 布儒斯特窗片厚度为 3 毫米。

图 9 和图 10 为对一个单模(TEM<sub>00</sub>)管和一个多模管的观察结果, 图中曲线系 6328Å 的输出功率随电流的变化, 每一图中两条曲线上的每组对应值同时测得。

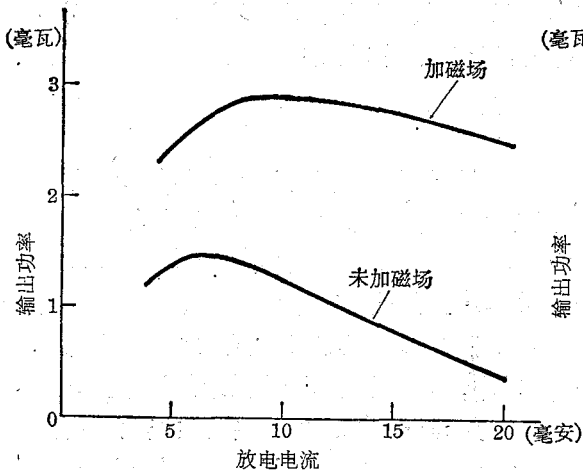


图9 磁场对单模(TEM<sub>00</sub>)管输出的影响

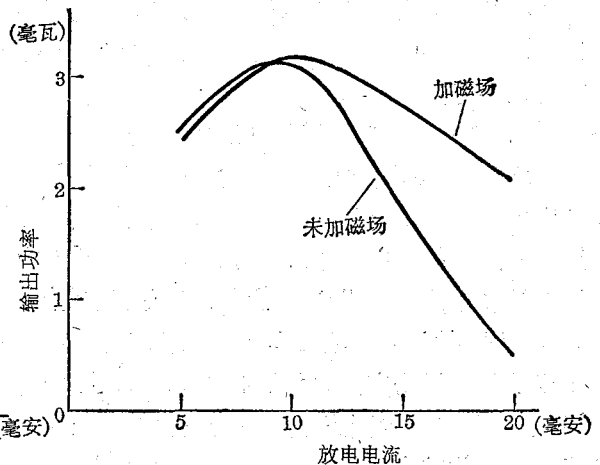


图10 磁场对多模管输出的影响

### 8. 功率漂移问题

长半径腔的内腔玻璃激光器对管身形变(机械的、温度的)反应很敏感,表现为普遍存在的程度不等的输出功率漂移问题。一阵冷风吹过激光管就可以看到其输出发生较大的变化,严重的可达50%以上,给使用带来一定的困难。为减轻漂移问题,用石英管制管效果很好(石英线胀系数只有硬玻璃的九分之一),但石英管成本既高,工艺又较困难,且器件的使用寿命不如玻璃管(因为石英管壁引起He的逃逸较严重)。加粗管身也能使得因管身热膨胀不均匀所引起的相对镜斜有所减轻,因而也能减轻漂移。

从加磁场的实验中我们发现,适当的磁场强度除提高了TEM<sub>00</sub>模管子的输出功率外,还提高了功率输出的稳定性。一次对一玻璃单模管进行四个半小时的观察,所加磁场150高斯左右,输出功率 $P$ 变动范围3.25~3.40毫瓦,绝对漂移 $\Delta P=0.15$ 毫瓦,相对漂移 $\Delta P/\bar{P}=0.15 \times 2 / (3.25+3.4) < 5\%$ 。其他情况下的结果虽没有这样好,但稳定效果还是显著的。

### 参 考 资 料

- [1] P. W. Smith, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-2**, No. 4 (1966), p. 77~79.
- [2] H. Kogelnik, *Lasers—a Series of Advances*, **1**, (1966), p. 295~342.
- [3] W. R. Bennett, Jr., *Supplement to Appl. Optics*, p. 24~62 (1962).
- [4] A. G. Fox, T. Li, *Proc. IEEE*, **51**, No. 1 (1963), p. 80~89
- [5] U. Hochuli, P. Haldmann, *Rev. Sci. Instr.*, **36**, No. 10 (1965), p. 1493~1494.