

15W 氩离子激光器的研制*

陈振庭 成毓秀 沈高志 赵瑞英

提 要

本文讨论了15W 氩离子激光器结构的设计基础,并在一个分段石墨结构的氩放电管中,采用4mm的放电孔径,在60A的放电电流下,获得了15W左右的激光功率输出。

将氩离子激光器作为一种相干光源的某些应用中,例如连续波染料激光器用的泵激光源、计算机信息显示和绘图用的照明光源,都要求提供一台输出功率比较大的氩离子激光器。而一般的氩离子激光器的输出功率均在10W以下,远远满足不了这些专门应用的要求。因此,研制输出功率在10W以上的氩离子激光器已成为当前气体激光器研制工作的一个重要课题。

提高氩离子激光器输出功率的主要途径有:(1)增大放电电流;(2)增大产生激光作用的激活媒质的体积;(3)在放电管上附加一个轴向均匀磁场。

G. Herziger 等人^[1]在理论上求解了稳态条件下的稀有气体离子激光器中受激离子的速率方程,得出了激光器输出功率的数学表达式,并把计算结果表示为充气气压、放电电流和放电管几何尺寸的函数。G. Herziger 指出,在谐振腔反射镜的间距足够大,可以把激光谱线的加宽看成是均匀加宽的情况下,氩离子激光器的单谱线输出功率为:

$$\Phi = \frac{T}{\nu} \pi R^2 L (h\nu) A_2 (\Delta N - \Delta N_t) \quad (1)$$

式中, T ——输出反射镜的透过率, ν ——谐振腔的单通损耗, R ——放电管半径, $h\nu$ ——辐射光子的能量, A_2 ——上激光能级的爱因斯坦 A 系数, L ——激活媒质的长度, ΔN ——集居数反转密度, ΔN_t ——在自激阈值附近的集居数反转密度。

在要求激光器有较大功率输出的放电电流密度下,一般都有 $\Delta N \gg \Delta N_t$,即阈值附近的集居数反转密度可略去不计,而且

$$\Delta N \propto \frac{\sqrt{kT_e/e(Q_a N_0)}}{(1 + 0.47kT_e/e)} j^2 \quad (2)$$

式中, k ——玻尔兹曼常数, T_e ——电子温度, e ——电子电荷, j ——电流密度, N_0 ——气压为1托、温度为273°K时的气体密度, Q_a ——电子与中性原子弹性碰撞截面。那么,

$$\Phi \propto \frac{T}{\nu} L \cdot (jR)^2 \quad (3)$$

或者

$$\Phi \propto \frac{T}{\nu} L \frac{I^2}{R^2} \quad (4)$$

* 1979年8月7日收到。

可以看出,激光器的输出功率 Φ 不仅正比于激活媒质的长度 L ,而且比例于放电电流密度 j 和放电管半径 R 乘积的平方,同时还取决于放电中的电子温度和气体密度。因此,提高放电管中的放电电流密度和增大激活媒质的体积,对于实现氩离子激光器的大功率运转都是有利的。离子激光器的实验证实,在 $1000\text{A}/\text{cm}^2$ 的放电电流密度下,还没有观察到由于辐射俘获现象的加剧而造成输出功率饱和的现象,也就是说,用进一步增大放电电流的方法来提提高激光器的输出功率还大有可为。但是,在技术上和工艺上存在着许多问题和困难,因此,对等离子体放电管的管壁材料的选择和放电管的结构必须予以特别的注意。

目前,氩离子激光器的工作效率并不太高,一般为 10^{-3} — 10^{-4} 。为了提高输出功率,必须增加放电管的输入电功率。输入的电功率除了一小部分转换为激光辐射功率以外,绝大部分都消耗在管壁上。在放电管中,每单位长度消耗的电功率为:

$$P_R + P_V + P_W = E_z I \quad (5)$$

式中, P_R ——辐射功率, P_W ——管壁耗散功率, P_V ——放电正柱中的体积耗散功率, E_z ——轴向场强。在低气压弧光放电中, $P_V + P_R \ll P_W$ 。而且,在氩离子激光器工作的放电电流范围内,轴向场强 E_z 与放电管半径 R 成反比^[1],即 $E_z R = 0.65\text{V}$,从而有

$$P_W \approx E_z I \approx 0.65 \frac{I}{R} \quad (6)$$

可见,管壁耗散功率也与放电管半径成反比。增加放电管半径,可减小管壁所耗散的功率。但是,随着放电电流的增大,管壁所耗散的功率也要增大,管壁温度将急剧上升。因此,要求放电管材料能耐高温,并且能迅速地把热量转移走。实验证明,用高纯质石墨作为等离子体放电管的管壁材料是比较合适的。

在一个小功率氩离子激光器的分段石墨结构的放电管中^[2],当放电孔径为 2.7mm 时,最大的工作电流可达 35A 。由(6)式可以算出,在管壁功率耗散能力相等而且冷却状态相同的条件下,当放电孔径增加到 4mm 时,最大的工作电流可以增大到 55A 左右。可见,增大放电管半径对于提高激光器的输出功率是有利的。但是,放电电流的增大将大大地增加管壁所耗散的功率,因此,必须适当地增大石墨片的表面积,以增加热辐射面积。

另一方面,输出功率与放电长度成正比,所以,总是希望放电长度尽可能长一些。但是,在氩离子激光器中,通常采用恒定的直流电压供电。为简单起见,用 50Hz 三相交流电经三相全波整流电路和滤波系统,获得 530V 左右的直流电压输出。为了使激光器触发放电容易和工作稳定,放电管两端的管压降必须低于 450V ,这时对放电长度的选取给出了一个上限。放电管两端的管压降 U 应等于阳极压降 U_a 、阴极压降 U_K 和正柱压降 U_z 的总和。在低气压弧光放电的等离子体中,不管放电孔径如何,阳极压降 U_a 和阴极压降 U_K 几乎不变。按定义,弧光放电的正柱压降 U_z 为

$$U_z = E_z L = 0.65 \frac{L}{R} (V) \quad (7)$$

在一个小功率的分段石墨结构的放电管中^[2],放电孔径为 2.7mm ,测得的管压降 $U \approx 400\text{V}$ 。从(7)式算得的正柱压降 $U_z \approx 350\text{V}$,则 $U_K + U_a \approx 50\text{V}$ 。那么,对于 4mm 孔径的放电管,由(7)式算得的放电长度近似为 120cm 。这是一种近似计算,因为放电管的管压降不仅与放电电流有关,而且还与石墨片的厚度和间隔、充气气压、阳极和阴极的几何形状

和位置有关。因此,放电长度必须通过实验方法来调整。

从上面的分析出发,我们设计并制作了一个输出功率为 15W 的分段石墨结构的氩放电管。形状与小功率氩放电管^[2]相似。石墨片的具体尺寸是:外径 44mm,厚度 8mm,中心放电孔径 4mm,放电长度 102cm。在每一块石墨片上都钻了 60—70 个直径为 3.5mm 的小孔(如图 1 所示),组成平衡放电管两端气压差的内部回气管。放电管内有石墨阳极和直热式浸渍钨钨阴极。石英管放在金属水冷套内。

为了组成一个准直的放电通道,在放电管的加工和制作时,必须特别注意:(1)石墨片外圆直径的容差应保持在 0.05mm 以内;(2)石墨片的中心放电孔与外圆直径的不同心度应不大于 0.02 mm;(3)放置石墨片的石英管必须经过校直,它的内径要均匀,并比石墨片外径大 0.2mm 左右,以便在放电状态下石墨膨胀以后,正好与石英管内径吻合,不致于太紧或者太松;(4)两块石墨片之间的三个石英环的厚度必须一致,误差不得超过 0.05mm。

在放电管上通常都附加一个轴向均匀磁场。磁场有约束等离子体的作用,可以使放电中的电子和离子向管轴方向收缩,一方面可以减轻离子对管壁的轰击,延长放电管的工作寿命;另一方面,可以提高管轴上的电子密度和离子密度,亦即提高放电电流密度,这有利于激光器输出功率的增加。在放电管的设计中采用了水冷却的螺旋管磁场,用高强度的聚酯漆包铜线直接在金属水冷套上密绕而成。轴向磁场采用额定的直流电压(500V 左右)供电是方便的。为了满足最佳激光作用所要求的最佳磁场强度,必须选择合适的漆包铜线的直径和绕制的层数。

漆包线的直径 d 可用下式计算: *

$$d^2 = \frac{\rho HL}{0.1\pi V} \left[D_{\text{内}} + \frac{H}{0.1\pi^2 j} \right] \quad (8)$$

式中, H ——最佳磁场强度, L ——磁场线包长度, V ——供电电压, $D_{\text{内}}$ ——磁场线包的內径或水冷套外径, j ——水冷却状态下,漆包线允许通过的电流密度,(在我们的设计中,按经验,一般取 $j = 12-13\text{A}/\text{mm}^2$ 。) ρ ——在线包工作温度下铜线的电导率。(若线包的平均工作温为 80°C 时,则 $\rho \approx 2.24 \times 10^{-6}\Omega\text{-cm}$ 。)

磁场线包的层数 M (取整数)可近似地用下式计算:

$$M \approx Nd' = \frac{H}{0.1\pi^2 jd'} \quad (9)$$

式中, N ——单位长度的匝数, d' ——包括漆皮在内的线径。磁场线圈的层数取偶数,这

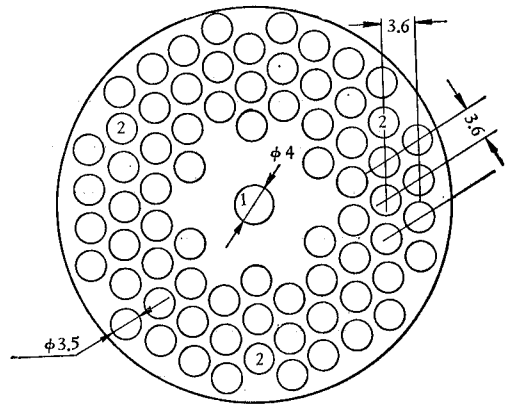


图 1 石墨片形状

1——放电孔 2——回气孔

* 此公式是根据无限长螺旋管磁场公式推导出来的,推导过程这里从略

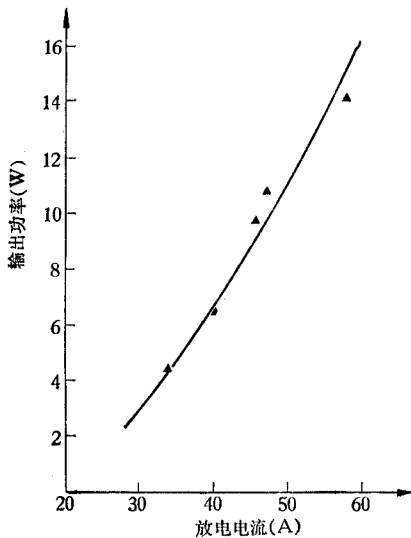
只是为了引出引线方便而已。

表 1 列出了几种型号氩离子激光器水冷磁场的设计值和实测值。两者之差在 $\pm 30\text{Gs}$ 以内,这对于氩离子激光器的最佳运转来说还是允许的。

表 1 水冷却磁场的设计

管 型		DAJ-1 ^[2]	DAJ-2	DAJ-4*
放电孔径(mm)		2.7	2.0	4.0
最佳磁场(Gs)(设计值)		800	900	750
供电电压(V)		500	500	500
线包长度(cm)		77	46	110
线包内径(cm)		5.5	5.5	6.5
漆包线直径(mm)	计算值	0.736	0.608	0.916
	实用值	0.72	0.59	0.90
线包层数	计算值	9.4	12.89	7.04
	实用值	10	14	8
磁场强度(Gs)(实测值)		810	930	730
设计值与实测值之差(Gs)		+10	+30	-20

* 指本文所述的管型。



放电孔径: 4mm 放电长度: 102cm
充气气压: 0.3 托 最佳磁场: 740Gs

图 2 输出功率与放电电流的关系

图 2 表示该激光器输出功率与放电电流依赖关系的测试结果。谐振腔包括一个全反的平面镜(或曲率半径为 3m 的球面镜)和一个曲率半径为 3m 的输出反射镜,透过率为 12% (4880Å) 和 14% (5145Å)。反射镜是用氧化锆和二氧化硅蒸镀成的“过渡”硬膜。输出功率是用 GG-3 型激光功率计(苏北电子仪器厂)测量,并用 CR-201 型激光功率计(Coherent Radiation, Co.)定标。在充气气压为 0.3 托、最佳磁场为 740Gs 的条件下,在 50A 时,功率为 10W;在 58A 时,功率为 15W。该放电管可以较长时间在 13—15W 输出功率下稳定地工作。

在研制工作中,得到我室玻璃组、光学冷加工组、镀膜组的同志们的大力协助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] G. Herziger, *Z. Physik*, 215(1968), 437.
[2] 陈振庭等,物理, 5 (1977), 260.