

长寿命的氩离子激光器

陈振庭 黄振国 沈高志 高正基 梅其初

(中国科学院电子学研究所)

氩离子激光器是目前在可见光谱区可得到的输出功率最大的连续气体激光器,而且它的输出波长极其丰富,具有波长选择的灵活性。如果采用适当的腔内色散元件,就可以方便地选择出所需的工作波长(见表1)。因为氩离子激光器具有一些独特的优点,所以它的应用也就日益广泛起来。

表1 氩离子激光器的工作波长和输出功率

波 长 (埃)	4579.39	4657.94	4726.91	4764.89
功 率 ¹⁾ (瓦)	0.1			0.6
波 长 (埃)	4879.90	4965.12	5017.63	5145.92
功 率 (瓦)	1.8	0.5	0.3	2.4

1)表中的输出功率指的是多横模输出。

随着科学研究和应用技术的发展,对于氩离子激光器的输出功率、工作寿命和输出稳定性方面,都提出了更高的要求。因此,制作一个具有输出功率大、工作寿命长和稳定性高的氩离子激光器,已是一件亟待解决的任务。

本文介绍了一个长寿命的氩离子激光器,较详细地论述了影响放电管寿命的因素以及为保证放电管长寿命地工作而采取的措施,其中包括放电管管壁材料的选择、放电管的结构、气压指示装置和布儒斯特角窗片的辉光放电保护装置。

一、管壁功率耗散和管壁材料

氩离子激光器是一种低电压大电流的弧光放电器件。在一般的情况下,输入到放电管内的直流电功率在15瓦左右。输入电功率除了一小部分被转换成激光辐射输出以外,仍然有一大部分(约占80%)要消耗在放电毛细管内并通过放电管的管壁耗散掉。根据等离子体能量平衡方程,每单位放电长度的总功率耗散为

$$\pi R^2 j E_z = P_w + P_e + P_R \quad (1)$$

式中, P_w 是管壁耗散的功率, P_e 是等离子体正柱中的体耗散功率, P_R 是被转换成激光辐射的功率, E_z

是轴向电位梯度, j 是放电电流密度, R 是放电毛细管的半径。在低气压的弧光放电正柱中,

$$P_w \gg P_e + P_R \quad (2)$$

在氩离子激光器的典型工作条件下,放电等离子体将遵从 Tonks-Langmuir 的低气压正柱理论,可以导出如下的管壁电位 V_w , 至管壁的径向离子流密度 i_{iw} 和径向电子流密度 i_{ew} ^[1] 分别为:

$$i_{iw} = 0.382 e N_e \sqrt{kT_e/m_i}; \quad (3)$$

$$i_{ew} = e N_e \sqrt{\frac{kT_e}{2m_e}} \exp\left(-\frac{eV_w}{kT_e}\right) \quad (4)$$

$$\text{由此可得 } V_w = \frac{kT_e}{e} \ln(1.045 \sqrt{m_i/m_e}) \quad (5)$$

式中, N_e 是管轴处的电子密度, T_e 是电子温度, k 是玻尔兹曼常数, e 是电子电荷, m_e 是电子质量, m_i 是离子质量。在氩离子激光放电中,当电子温度 $T_e = 5 \times 10^4$ K 时,管壁相对于等离子体轴的电位 $V_w \approx -25$ 伏。在分段的石墨放电管中, V_w 实际上是管壁的平均电位(图1)。而每块石墨片的阴极端和阳极端的电

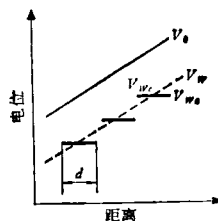


图1 分段石墨放电管中的电位分布

位 V_{wc} 和 V_{wa} 分别为^[2]:

$$V_{wc} = V_w - \frac{kT_e}{e} \ln\left(\frac{\eta}{1 - e^{-\eta}}\right); \quad (6)$$

$$V_{wa} = V_w + E_z d - \frac{kT_e}{e} \ln\left(\frac{\eta}{1 - e^{-\eta}}\right) \quad (7)$$

式中, $\eta = \frac{eE_z d}{kT_e}$, d 是石墨片的厚度。那么,径向离子

流轰击管壁时,递交给放电管管壁的功率为

$$P_w = 2\pi R i_{iw} (V_w + V_i) \quad (8)$$

式中, V_i 是氩原子的电离电位。因此, 当一个单电离的氩离子轰击管壁并在管壁处与电子复合成中性原子时, 要把 25 电子伏左右的加速动能和 15.7 电子伏的电离能交给管壁, 而二次电离的氩离子的轰击能量近似增加一倍。二次电离的氩离子在弧光放电等离子体中是存在的, 它的浓度随着放电电流的增加而增加。从 (6) 式和 (7) 式还可以看出, 石墨片的阳极端要比阴极端承受更大的离子轰击能量。

实验上和理论上^[1]都已证实, 氩离子激光器的输出功率近似与放电电流密度的平方成正比。为了提高激光器的输出功率, 增大放电电流是一种有效的途径。但是, 随着放电电流的增加, 等离子体中的电子密度和电子温度也都相应地增加, 结果, 管壁所应承受的离子轰击能量也就大大地增加。当然, 附加了轴向磁场以后, 由于轴向磁场对等离子体的约束作用, 一方面增加了管轴上的电子密度和离子密度, 另一方面降低了电子温度和轴向电位梯度。轴向磁场的作用除了增大激光器的输出功率以外, 还能使轰击管壁的径向离子流密度减小, 也就可以减轻管壁所应承受的离子轰击能量。在氩离子激光器的典型工作条件下, 管壁所应承受的功率耗散能力一般要达到每厘米放电长度 100—500 瓦, 它随着放电电流和放电管半径而异。由于这种

能量交换过程, 使管壁温度急剧上升, 即使用连续流动的自来水帮助冷却, 仍应要求管壁材料具有耐高温和耐热冲击的能力, 才不会因急剧升温而破坏。另外, 具有如此高能量的氩离子对管壁的轰击, 使管壁材料严重地溅散腐蚀, 并增加了气体的清除速率。这些因素都直接影响着氩离子激光器的工作寿命和稳定性。

因此, 放电管管壁材料的选择是设计和制作大功率、长寿命和高稳定性的氩离子激光器的关键问题之一。目前, 可供选择的管壁材料有石英、氧化铝陶瓷、氧化铍陶瓷、石墨、合金铝、钨和热解石墨。但使用最普遍的还是石墨和氧化铍陶瓷。它们的性能列于表 2 中。本文所述的氩离子激光器采用高纯质密的石墨作为放电毛细管的管壁材料。石墨的优点是: (1) 辐射系数大, 耐高温, 导热性能好, 对散热有利, 具有较高的功率耗散能力; (2) 溅散阈值较高, 可以减轻因离子轰击所造成的溅散腐蚀, 降低气体的清除速率, 延长放电管的工作寿命; (3) 抗热冲击性能好, 允许在更大的电流密度下工作; (4) 加工方便, 价格便宜。实验证明, 采用高纯质密的石墨作为放电毛细管的管壁材料并对放电管的结构和石墨的真空热处理进行认真细致的考虑, 那么, 它在提高激光器的输出功率和延长放电管的工作寿命方面, 是有非常大的发展前途的。

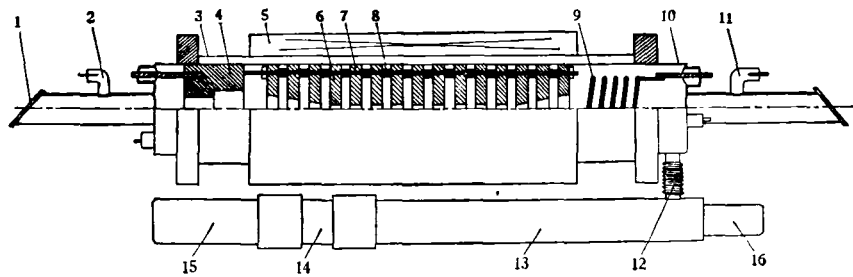


图 2 分段石墨放电管结构示意图

- 1—布儒斯特角窗片; 2—阳极针; 3—金属水冷套; 4—石墨阳极; 5—轴向磁场线圈; 6—石墨片;
7—氧化铝陶瓷杆; 8—石英环; 9—直热式钨-钨阴极; 10—石英管; 11—阴极针; 12—不锈钢波纹管;
13—镇气瓶; 14—电磁真空充气阀; 15—贮气瓶; 16—气压检测器

表 2 放电管管壁材料的性能

管壁材料	导热率 (卡/厘米·秒·°C)	热膨胀系数 (1/°C)	热冲击 (卡/厘米·秒)	熔点 (°C)	电阻率 (欧姆·厘米)	气体清除速率 (毫克·升/小时)
石英	3.5×10^{-3}	5.5×10^{-7}	13.0	~1600	$> 10^{13}$	10~20
氧化铝陶瓷	5.4×10^{-2}	6.5×10^{-6}	3.5	~2100	$> 10^{13}$	
氧化铍陶瓷	5.25×10^{-1}	5.4×10^{-6}	11.7	~2600	$> 10^{13}$	0.1~0.15
石墨	0.3	3.6×10^{-6}	310	~3500	3×10^{-6}	0.4~3.2
合金铝	0.57	1.64×10^{-5}			2.6×10^{-6}	
钨	0.48	4×10^{-6}		~3370	5.5×10^{-6}	
热解石墨 ¹⁾	A ²⁾ : 0.48 C: 4.8×10^{-3}	A: $(44 \sim 120) \times 10^{-5}$ C: 24×10^{-3}			A: 2.25×10^{-4} C: 0.35 ³⁾	

1) Pyrolytic graphite.

2) A 向指沉积方向, A 向垂直于 C 向。

3) 指 1000°C 时的电阻率。

二、放电管的结构

氩离子激光器放电管的设计主要是每单位放电长度必须有最大的激光功率输出,同时还应考虑到放电管的工作稳定性、工作寿命、效率和体积重量。图2表示放电管结构的略图。

放电毛细管是由高纯质密的石墨片构成的。石墨的性能参数是:比重——1.9克/厘米³;强度——700公斤/厘米²以上;灰分小于0.01%;粒度——70微米。

为了保证放电管的工作性能并延长它的工作寿命,必须对石墨进行认真的真空热处理。真空高频烘烤是用30瓩的高频加热设备和大抽速的真空机组进行的。真空高频烘烤要进行两次。第一次是对分段石墨放电毛细管进行真空高频烘烤,目的是去除石墨片中的有机杂质。第二次是对整个放电管进行真空高频烘烤,对石墨片进行真空热处理,彻底地去除杂质气体。高频烘烤的温度为1200—1300℃,在热状态下,动态真空度应达到10⁻³毫米汞柱。切记,石墨片的加温速度不宜太快,避免在放电管内产生高频放电,否则会使窗片内表面沾污。分段的石墨放电管经过这样的真空热处理,可以长时间地在35安以下的放电电流工作,未见真空性能有明显变化。

阴极是氩离子激光器放电管的中心,它的寿命直接影响着放电管的工作寿命,因此,选择合适的阴极也是设计长寿命的氩离子激光器的关键问题之一。对于阴极的其他要求是:发射能力大、耐离子轰击、抗中毒性能好。本器件采用的是直热式的钨-钨阴极,加热功率为120—140瓦(电压6—7伏,电流20安)。这种阴极在气体放电的状态下,发射电流可达50安以上。直热式钨-钨阴极的优点是预热快(约1分钟),加热功率小,发射能力大且稳定,不易中毒和寿命长等等。

水冷套是用金属做成的。软化后的自来水在金属管和石英管之间的隙缝(3—5毫米)连续地流动,它除了冷却放电毛细管以外,还同时冷却轴向磁场。采用“0”形橡皮圈进行水的密封。

轴向磁场的作用在于约束激光放电的等离子体,可以提高激光器的输出功率,也对延长放电管的工作寿命有利。但是,存在着一个最佳的轴向磁场,它与放电电流、充气气压、放电毛细管的直径以及激光跃迁的

波长有关。轴向磁场的线圈直接绕在金属水冷套的外侧,借助流动的自来水帮助冷却,使导线允许通过的电流密度增加到13安/毫米²。这可以使整个轴向磁场的体积重量大大地减小。轴向磁场是用直径0.72毫米的QZ型高强度聚脂漆包铜线在金属水冷套上密绕而成的,层数10层,长度77厘米,耗铜量8.5公斤左右。在直流供电电压为480伏时,热平衡状态下的磁场电流为4.5安,此时测得的轴向磁场强度是750高斯。

三、再充气系统和气压检测

氩离子激光器中存在着一个最佳的工作气压,它取决于放电毛细管的半径和放电电流,与放电毛细管的半径成反比,随着放电电流的增加而略有增加。G. Herziger的计算表明^[1],在最佳的激光作用条件下,放电管中的气体密度*N*为

$$NR/N_0R_0 = (0.5 - 1.0) \times 10^{-2} \quad (9)$$

式中*R*₀ = 1厘米 *N*₀ = 3.53 × 10¹⁶厘米⁻³,是在气压*P*₀ = 1托,温度*T*₀ = 273°K时的气体密度。所以,放电管中的最佳气压*P*_i为

$$P_i = \frac{T_i}{273R} \times (0.5 \sim 1.0) \times 10^{-2} (\text{托}) \quad (10)$$

式中,*T*_i是等离子体中的气体温度(°K),*R*是放电毛细管的半径(厘米)。当放电毛细管的直径为2.7毫米时,测得的最佳气压在0.35—0.45托范围内,与从(10)式算出的结果大致相符。

石墨在气体放电中的气体清除速率还是较大的,一般为0.4—3毫托·升/小时。氩离子激光器放电管在工作一段时间以后,由于气体清除作用,管中的气压会逐渐降低,当气压偏离于最佳气压到一定程度时,会使激光器的输出功率下降,管压降升高,工作稳定性变坏,有时放电管甚至不能触发放电和正常工作。实验表明,一次充气最多也只能工作几十小时。为了保证放电管的工作稳定性和工作寿命,必须专门设置一个电磁真空充气阀。当放电管工作了一段时间以后,管中的气压降低到一定程度,给放电管进行再充气,补充被清除掉的那部分氩气,以便保证放电管永远工作在最佳气压下。

电磁真空充气阀是由一对针阀组成的(图3)。针阀主要由带锥孔的阀座5(软金属)和锥形的活动针塞4

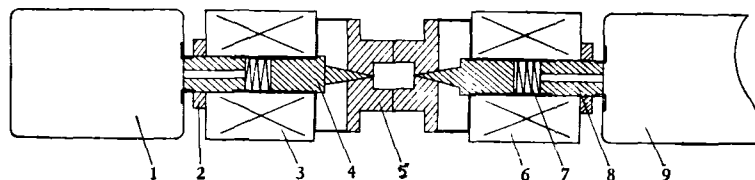


图3 电磁真空充气阀的结构示意图

1——贮气瓶; 2——紧固螺母; 3——电磁线圈1; 4——活动针塞; 5——阀座;
6——电磁线圈2; 7——压缩弹簧; 8——固定块; 9——镇气瓶

(硬金属)组成。为保证良好的真空密封性能,一方面要求阀座和针塞之间较大的接触面积和较好的配合精度,为此,阀座和针塞要用抛光粉进行对磨抛光。另一方面,依靠一个压缩弹簧7给针塞施加一个压力,两个针阀的开关动作是由一对电磁线圈3和6分别控制的。控制电路的原理如图4所示。

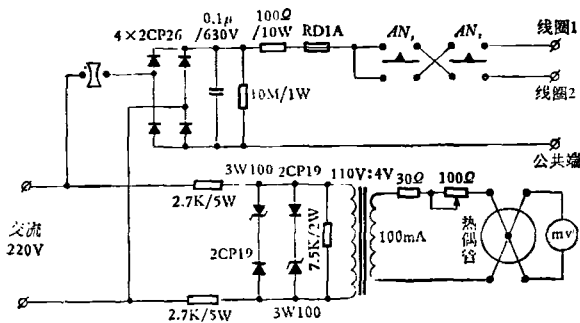


图4 气压检测和充气控制的电路原理

电磁真空充气阀的密封全部采用真空钎焊。在针阀闭合时,整个阀体应该是气密的,它的静态真空度应能保持在 10^{-4} 毫米汞柱以上。针阀的漏气速率应小于 10^{-8} 毫·升/小时。电磁真空充气阀的一端与贮气瓶1相连,贮气瓶中所充的氩气压为500毫左右。另一端与镇气瓶相连。镇气瓶的作用在于保证在放电管的工作期间,管中的气压能稳定在最佳状态。在再充气时,每次充进放电管中的气压应等于最佳气压的 $1/10-1/20$,以避免过充气。因此,两个针阀之间的过渡体积必须由贮气瓶气压、每次应充的气压和放电管的总体积决定。

为了监视放电管在工作时的气压变化,判断是否应给放电管进行再充气,必须配备一个气压检测和指示的装置。气压检测器实际上是一个热电偶真空计。热电偶用镍-铬丝和康铜丝点焊而成,为确保在最佳气压范围内的测量具有良好的线性,镍-铬丝和康铜丝的粗细应当适当选择。其中一对热电偶作为加热之用,加热电流约为30毫安,另一对热电偶则作为测它的热电动势之用。当加热电流恒定不变而管中气压发生变化时,热电偶接点的温度也发生变化,测得的热电动势也相应发生变化。放电管中所设置的气压检测器未经校准,它的指示是相对的,可通过调节热电偶的加热电流来调整电表指针的位置。在放电管工作时,允许电表指针在一个指定的范围内变化,也就是说,允许放电管中的气压在一定范围内变化。气压检测和指示的电路原理如图4所示。

四、布儒斯特角窗片及其防护

布儒斯特角窗片的光学质量,也即它的光学损失对激光器的输出功率有极大的影响,因此必须采用透

过率高、气泡少和热稳定性好的光学材料,同时要注意保持窗片的清洁,防止灰尘和杂质沾污窗片。

窗片的真空密封用的是光胶的方法,忌用环氧树脂密封。因为在环氧树脂的加温固化期间,环氧树脂的蒸汽会沾污窗片的内表面。另一方面,环氧树脂固化以后,由于树脂的收缩,在窗片上会产生很大的应力,当光束通过时会产生双折射现象,增加窗片的光学损失。放电管在真空高频烘烤时,最好也把窗片同时加温到 300°C 左右,这一方面可去除窗片附近的湿气,另一方面可防止杂质气体凝聚在窗片的内表面上。

放电管在工作时,放电中的带电粒子(除了氩离子以外,还有石墨颗粒及杂质分子等带电粒子)向着放电管端部的布儒斯特角窗片方向运动并静电地附着在窗片上,使窗片沾污,光学损失增加。为此,在放电管的阳极和阴极附近各设置一个针状电极,在阳极端的称为阳极针,在阴极端的称为阴极针。提供一套针电极辉光放电电源(图5),以便在阳极针和阳极以及阴极针和阴极之间产生辉光放电,分别造成一个正电场。这个正电场阻止了带电粒子向窗片方向运动或者使带电粒子吸向针电极。这样,带电粒子就不会静电地附着在窗片上,达到保护窗片使其清洁的目的。

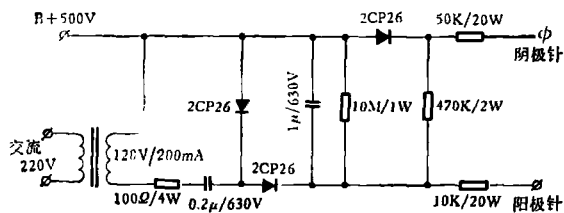


图5 针电极辉光放电电源的电路原理

五、结束语

影响氩离子激光器工作寿命的主要因素是:(1)放电毛细管管壁材料的选择和结构的合理设计,(2)气体放电中的气体清除效应;(3)布儒斯特角窗片的光学损失;(4)阴极的发射性能和寿命等等。我们这里所说的激光器的工作寿命是与激光器的输出功率及工作稳定性紧密相关的。一旦输出功率严重下降和稳定性变坏,就认为激光器的工作寿命已经終了。由于采取了上述措施,尤其是采用了电磁真空充气阀作为再充气的手段,补偿了气体清除的影响,已经使氩离子激光器稳定地工作了1500小时以上,未见激光器的输出功率和稳定性有显著的变化。但是,窗片的光学损失及其防护和阴极的发射性能及其寿命,已成为影响氩离子激光器工作寿命的主要因素。

参 考 文 献

- [1] Tonks, L., *Phys. Rev.*, **34** (1929), 876.
- [2] G. Hernqvist, K., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-3** (1967), 66.
- [3] Herziger, G., *Z. Physik*, **215** (1968), 437.