

分段石墨放电管的结构及其性能

中国科学院电子学研究所 502 组

提 要

本文从输出功率和放电管管壁的功率负荷出发, 考虑了分段石墨放电管的结构改进。介绍了采用这种新型放电管结构的氩离子激光器的性能, 并对最佳气压和最佳磁场提出了定性的解释。

一、前 言

提高氩离子激光器输出功率的重要途径在于增加放电管中的电流密度, 这样就会增加放电毛细管的耗散功率负荷, 因而对放电管管壁材料有更高的要求。从应用石英放电管到应用分段金属放电管, 及至应用氧化铍陶瓷放电管作为氩离子激光器的等离子体放电管, 其目的都是为了提高管壁的耗散功率能力和延长放电管工作寿命。本文分析了石墨放电管的结构与性能。

二、分段石墨放电管

1. 放电管的结构

目前, 广泛采用高纯致密石墨作为氩离子激光器的放电管材料。优点是: (1) 辐射系数大, 导热性能好, 其导热率约为 0.3 卡/厘米·秒·度, 与铝相近; (2) 致密性高和硬度大的石墨, 溅射阈值较高, 可以降低气体清除速率, 延长放电管的工作寿命; (3) 抗热冲击性能约为 310 卡/厘米·秒, 是所有放电管材料中最高的一种, 因此允许通过更大的电流密度, 而不会引起管壁的损伤和突然炸裂; (4) 加工方便, 价格便宜。

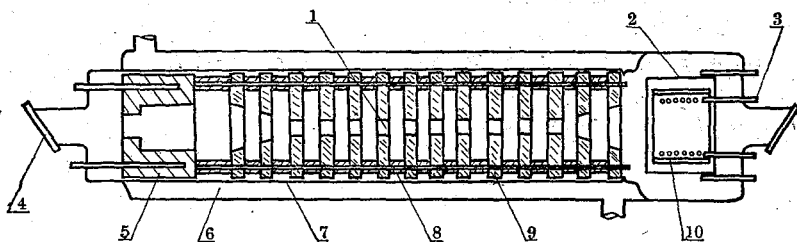


图1 分段石墨放电管结构示意图

1—放电毛细管; 2—护热罩; 3—加热灯丝; 4—布儒斯特窗片; 5—石墨阳极; 6—水冷套;
7—石墨管; 8—石英环; 9—石墨片; 10—钨钨阴极

图1表示氩离子激光器分段石墨放电管的结构示意图。放电管的主体是由分段石墨片组成的放电毛细管。石墨片由两根直径为3.5毫米的氧化铝陶瓷杆串起来,并用小石英环使石墨片彼此隔开,提供片与片之间的绝缘性能。分段的石墨放电毛细管被放置在一个带有水冷套的石英管内。在其两端有供电子发射的间热式钨钨阴极(发射面积为20厘米²,加热功率为250瓦)和收集电子用的石墨阳极(与管轴同心放置)。终端为光胶的布儒斯特窗片(光学熔融石英)。

2. 石墨片的外径

在分段石墨放电管中,消除放电管内壁功率负荷的主要途径为热传导和热辐射。

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot \frac{2\pi(T_2 - T_1)D}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + a\sigma T^4 S \quad (1)$$

式中, K 为导热率; r_1 和 r_2 为内壁和外壁的半径; T_1 和 T_2 为内壁和外壁的温度; D 为石墨片厚度; $\sigma = 5.67 \times 10^{-12}$ 瓦/厘米²·(度)⁴; S 为总辐射面积; a 为石墨的辐射能力。

由于石墨的辐射系数很大,因此,在消除功率负荷时,热辐射占优势。在氩离子激光器的工作状态下,放电管内壁温度一般接近于气体温度,在1000~2000°C左右,相应的热辐射峰值波长约为1.4~2.9微米之间。所以采用石英管并与水冷却系统相结合,有利于热辐射的顺利进行。

由(1)式可以看出,增加石墨片外壁半径 r_2 (即增加总辐射面积),对于消除功率负荷是有利的,但是,为了放电管结构的轻便紧凑,外径不宜太大。根据实验得知,石墨片外径选为35毫米左右是合适的。石墨片的具体尺寸还应根据石墨在工作温度下的径向膨胀来选择。假定石英管内径为 $2R = 35$ 毫米,根据热膨胀公式

$$\Delta R = \alpha T R \quad (2)$$

式中 α 是热膨胀系数, T 为石墨的工作温度。计算表明,在石墨片外径和石英管内径之间要留有0.13毫米左右的间隔,保证在石墨膨胀时,不至于使石英管胀裂。但是,间隔也不能太大,否则就不能保证放电管中石墨片的同心度,而且冷却效果不好。最后选取的石墨片外径应为 $2r_2 = 34.7 \pm 0.02$ 毫米。具体加工图如图2所示。

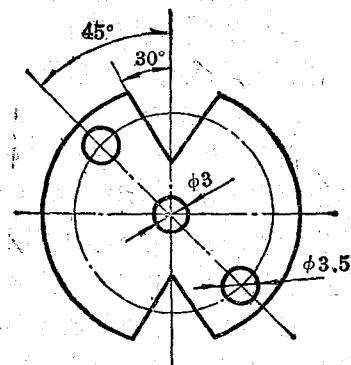


图2 石墨加工图

3. 石墨片的厚度

目前在参考资料上所采用的石墨片厚度都不尽相同,有人认为,石墨片的最大厚度与管径之比为50:1或者20:1。也有人从理论上进行计算^[1],结果表明,厚度正比于等离子体中的电子温度,反比于轴向电场强度,而且在轴向磁场存在时,其厚度还要进一步减小。

我们在实验中发现,石墨片的厚度应尽量薄。在我们的实验放电管中,采用的石墨片厚度为3~4毫米。其优点是:

- (1) 减轻每片石墨片阳极端的离子轰击,减少石墨粉末;
- (2) 触发放电容易,可以降低触发电源的电压和电流;
- (3) 高频去气时,容易获得更高的烘烤温度;
- (4) 放电管中单位长度的石墨片多,增加了石墨的总辐射面积,降低了分段石墨放电管的

工作温度。

4. 石墨片的间隔

石墨片是用来约束放电等离子体的,因此在决定石墨片的间隔时,必须先从放电等离子体正柱的合理约束来考虑,同时也应兼顾其他一些问题。实验表明,间隔为4~6毫米正适于放电管的最佳运转条件。

间隔大所带来的好处是热辐射作用的增加,从而使石墨片的工作温度降低。因此,气体温度也随之降低,气体密度增加,亦即充气气压大大增加,结果对提高输出功率有利。而且由于离子的平均自由程有了相应的减小,故对管壁的离子轰击将大大地减轻。

但是,若石墨片的间隔太大,其间电场的畸变太厉害,致使对等离子体的约束能力降低,等离子体正柱就要发散,尤其在气压低的时候更为严重,使正柱中的电流密度减小,输出功率降低。这时只有增加轴向磁场强度才能把等离子体正柱约束住。但是,此磁场强度已远超过激光器最佳运转时的磁场值,对激光器的最佳运转将造成不良的影响。

上述两个影响是相互矛盾的,在实验中,使其统一起来,取一个折衷的间隔4~6毫米。实验结果是令人满意的。

在放电管中,沿管轴方向的电子温度是不同的,尤其在靠近阴极的毛细管端,电子温度更低。解决的办法,一是利用非均匀的轴向磁场,另外是采用变间隔的分段石墨结构,即在阴极端,其间隔要比其他地方密一些,约为2~4毫米。

在实验中,我们得知,采用薄片中等间隔的分段石墨结构,在相同的放电电流和输出功率下,激光器的寿命要比厚片小间隔的结构长一倍左右,而且石墨粉末大大地减少了。

5. 内部回气管

在大电流密度和低气压下运转的氩离子激光器放电时,会产生严重的气体泵浦效应。在放电中,气体被集中在一个地方,破坏了放电中的气压平衡,影响放电管的正常运转。在小电流密度下,气体从阴极泵浦到阳极,造成 $P_A > P_C$ 。而在大电流密度下,过程相反,造成 $P_C > P_A$ 。实验证实,由气体泵浦造成的气压差 ΔP 取决于充气气压和放电电流。

在放电中,气体的输运存在着两种可能的途径,即离子在轴向电场作用下的输运 Q_i 和气体泵浦效应 Q_p 。 Q_i 来源于离子的轴向漂移,到达阴极区与电子复合,变成中性原子;而 Q_p 则来源于电子与气体原子之间的动量传递,使气体原子产生漂移,总是向着阳极运动。只有在某一个电流密度下,才能达到这两种输运方式之间的平衡,即 $Q_i = Q_p$ 。

无论如何,由于放电管中的上述两个效应所造成的气压不平衡,会影响到激光器的输出功率和工作稳定性。因此,必须采用附加的回气管,依靠气体的静态扩散作用来消除放电管两端的气压差。

在分段石墨放电管中,我们采用的是内部回气管。在石墨片上做成一个切口(三角形或方形均可),如图2所示,交错放置,可以提供满足需要的气导,而又不会使回气管被放电所击穿。采用内部回气管并使之靠近水冷的管壁,具有结构紧凑,坚固结实等优点。

在氩离子激光器最佳运转的气压状态下,回气管中的气导如下式所示:

$$U = \frac{S^2}{8\pi\eta L} \cdot \frac{1}{P_0} \text{ (秒/厘米}^3\text{)} \quad (3)$$

式中 S 和 L 分别为回气管的截面和长度; η 为气体流动的内摩擦系数,它是气体温度的函数,大约与气体温度的 $7/4$ 次幂成正比。由此可见,为提高回气管在平衡气压作用的能力,缩短长

度或增大截面是可取的,但却带来放电击穿的问题。另外,降低回气管中的气体温度会带来更大的好处。使回气管靠近水冷却的石英管壁(温度约 100°C 左右)要比放在石墨片内部(温度约为 1000°C 以上),取得更大的气导(约增加 7.8 倍)。

三、分段石墨氩离子激光器的性能

本实验是用改进后的分段石墨放电管进行的,具体参数如下:

石墨片外径 34.7 ± 0.02 毫米,内径 3.5 毫米,厚度 4 毫米,间隔 5 毫米。

放电毛细管长度 62 厘米,激光管总长度 1.2 米。采用石墨阳极,压溃钨钨阴极,光胶布儒斯特窗(光学熔融石英片)。

谐振腔用两个曲率半径为 3 米的多层介质膜反射镜组成,反射端 17 层,反射率 99% 以上;透射端 5 层,透过率为 14% (4880 \AA) 和 12% (5145 \AA),腔长 1.3 米。

这个激光器在放电电流为 34 A,最佳磁场为 750 高斯时,得到的最大多模多谱线输出功率约 5 瓦左右。

1. 输出功率与放电电流的关系

图 3 表示激光器多谱线输出功率与放电电流的关系。从图中可以看出,输出功率与放电电流的平方成比例。

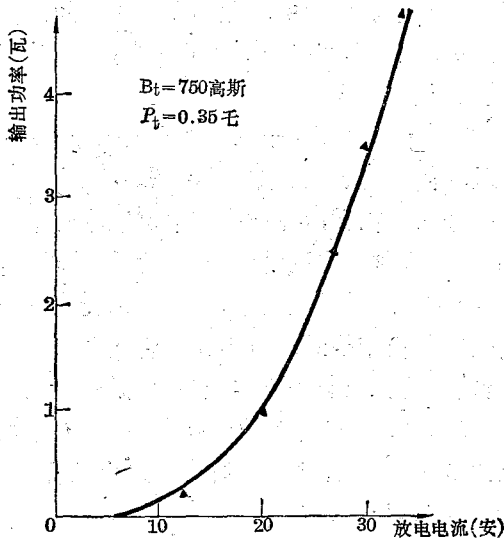


图 3 输出功率与放电电流的关系

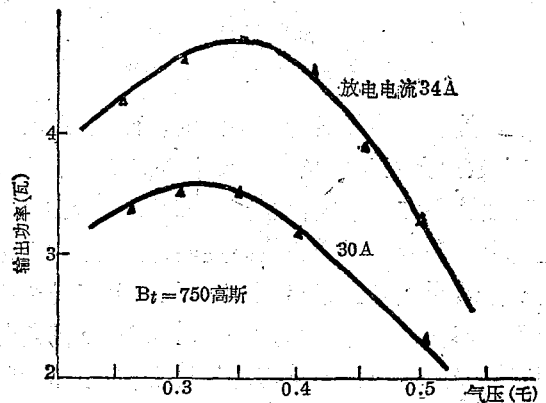


图 4 输出功率与充气气压的关系

2. 输出功率与气压的关系

充气气压决定着放电管中的气体密度,是产生激光辐射的物质基础。因此,气压对输出功率的影响也很大,如图 4 所示。放电管中的最佳气压不仅取决于放电电流,随着电流的增加而略有增大,而且还取决于放电管的半径。G. Herziger 的计算表明^[2]:

$$P_t \approx (3 \sim 5) \times 10^{-3} / R (\text{托}) \quad (4)$$

最佳气压的存在,可以用激光上能级的集居过程来说明。激光上能级的集居取决于与气体密度有关的电子密度和离子密度的乘积,还取决于电子与中性气体的相互作用截面以及电

子温度。气压高即意味着中性气体密度大，有利于获得更高的反转集居数。但是，气体密度大，电子在气体中运动的平均自由程缩短，碰撞频繁发生。这样，每一个电子在一个平均自由程中从电场所获得的能量变小。一方面电子温度降低；另一方面电子与气体原子的碰撞激发几率减少，也即相互作用截面变小，不利于集居数反转。因此，最佳的气压值的选取需要顾及到上述两方面因素。

3. 轴向磁场的作用

氩离子激光器加上轴向磁场以后，不仅能提高激光器的输出功率和效率，而且还能延长激光器的工作寿命。

磁场对等离子体正柱的影响在于约束等离子体，提高正柱中的电子密度和离子密度。沿着径向运动的电子在磁力线的作用下，将沿管轴作螺旋式的运动，使管轴附近的电子密度增加，从而导致电流密度和正柱区电导率的增加。同样道理，正离子也作螺旋式运动，向管轴附近集中，减小向管壁的扩散损失。因此，管轴附近的离子密度也增加了。由于磁场的这种影响，将更有利于能级集居数的反转和输出功率的提高。图5表示了激光器输出功率与轴向磁场的关系。实验证明，轴向磁场可以使激光器的输出功率提高1~2倍。轴向磁场的这种约束等离子体的作用，在分段石墨放电管中，尤其在石墨片间隔大的情况下，其作用更加明显，这时最佳磁场值也往往较高。

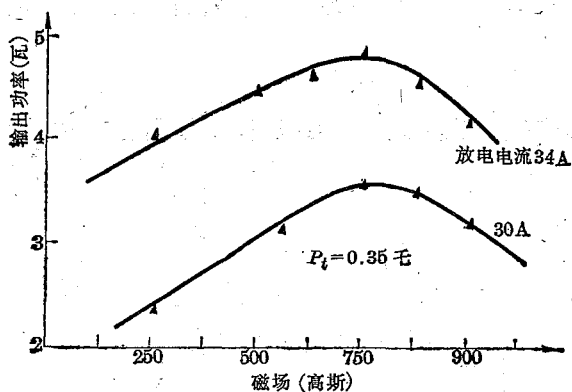


图5 输出功率与磁场的关系

另一方面，由于塞曼分裂的结果，轴向磁场使激光跃迁分裂成 σ_+ 和 σ_- 两个塞曼分量。在激活介质中，给定频率的增益对于左旋和右旋偏振光是不同的。而且，激活介质的折射率对于这两种偏振光也是不同的。这时，激活介质会使光产生法拉弟旋转。如果采用内腔结构或者垂直窗结构时，输出光束含有左旋圆偏振和右旋圆偏振两个部分。如果采用布儒斯特角窗结构时，输出光束将是椭圆偏振光。由于塞曼分裂和法拉弟旋转，光束通过布儒斯特窗时将会引起一定的损失，使激光器的输出功率减小。实验指出，在施加轴向磁场的氩离子激光器中，输出光束的椭圆度很小，在磁场为500高斯时，椭圆度为1%，而在1000高斯时，只达3%。还应提到，施加轴向磁场以后，椭圆偏振光通过布儒斯特窗时的损失，对于窗片的应力形变是相当敏感的。

可以看出，磁场对氩离子激光器的作用存在一个最佳的磁场值，使输出功率达到最大。最佳磁场是放电电流、气压、放电管直径及激光跃迁波长的函数。

此外，由于轴向磁场可以减少离子的径向扩散损失，使放电管管壁少受离子轰击，从而减轻了溅射、腐蚀和气体清除，有利于延长放电管的工作寿命。

四、结束语

氩离子激光器，由于采用了新型的分段石墨结构，可以使其性能得到进一步提高。但是这种结构仍然存在着一一些问题，有待于解决。例如：(1) 气体清除。石墨的气体清除速率约为

0.4~3 毫毛·升/小时, 尽管采取了加大贮气体积等措施, 但工作 200 小时左右, 还需再充气才能正常运转。因此, 解决轻便的再充气系统是首先要解决的问题之一。(2) 放电管内的部件, 尤其是石墨片在高温状态下工作, 会放出杂气(例如二氧化碳、氧及有机物), 造成石墨的严重溅射, 产生大量的石墨粉末, 沾污电极和窗片, 堵塞管道, 使输出功率严重地衰减甚至不能正常运转。

参 考 资 料

[1] A. Maitland; *J. Phys. D Appl. Phys.*, **4**, 907 (1971).

[2] G. Herziger; *Z. Phys.*, **215**, 437 (1968).

《晶体生长研究工作交流会》在福州召开

经国务院批准召开的晶体生长研究工作交流会, 在中国科学院和中共福建省委的直接领导和关怀下, 于一九七四年十月三日至十四日在福州召开。这次会议是无产阶级文化大革命以来我国晶体生长研究工作方面的工人、干部和科技人员的一次大会师, 是对晶体生长研究工作所取得的新成就的大检阅, 也是晶体生长研究工作者互相学习、交流经验、共同提高的一次极好聚会。各单位在会上提出的 143 篇报告和资料以及送展的 345 件实物展品和图片, 从各个不同的角度反映了无产阶级文化大革命以来我国晶体生长研究工作一片欣欣向荣的景象。

参加这次会议的, 有来自全国 21 个省、市、自治区 118 个单位的 292 名代表。他们中有来自三大革命运动第一线的工人、工农兵学员, 有战斗在科研和教育战线上的年青科学工作者, 有从事晶体生长研究工作多年的老一辈科学家。整个会议体现了老、中、青三结合, 体现了工人、干部、科技人员三结合以及科研、生产、教育三结合, 显示了在毛主席革命路线指引下我国晶体生长研究工作技术队伍朝气蓬勃、茁壮成长的新风貌。

除了水晶、云母等一些光学晶体外, 会上还着重讨论和交流了激光晶体红宝石、掺铈钇铝石榴石、铝酸钇等的生长工艺、温度控制、质量检验等问题, 对电光调制晶体和非线性光学材料, 如磷酸二氢铵、磷酸二氢钾、磷酸二氘钾、铌酸锂、铌酸锶钡、铌酸钡钠、铌酸锶钠锂、钽酸锂、碘酸锂等, 也进行了广泛的交流。

这次会议自始至终以党的基本路线为纲, 深入开展批林批孔, 做到了政治与业务的辩证统一, 改变了无产阶级文化大革命以前学术会议只谈技术, 不讲路线的状况。会议还初步确定了我国今后晶体生长研究工作的方向和任务。

这次会议是在全国一片大好形势下, 在迎接社会主义建设新高潮的战鼓声中召开的。代表们一致表示, 要继续坚持以党的基本路线为纲, 鼓足干劲, 力争上游, 为发展我国的晶体事业而努力奋斗。