

# 氧化铍-金属结构氩离子激光器\*

郑州大学物理系激光教研室氩激光研制组

## 提 要

本文介绍了氧化铍放电管的特点,描述了一种氧化铍-金属结构氩离子激光器的基本构造。在内径3.8毫米、长36厘米的氧化铍放电管氩离子激光器中,在40安培电流下获得了0.86瓦的激光输出。

氩离子激光器是目前可见光范围内连续输出功率最大的器件之一,其中主要波长是4880埃和5145埃,属于蓝绿光,正处于许多探测器的灵敏区域。这些特点使这种器件在多普勒测速、喇曼光谱、全息照相、水下探测、彩色显示及非线性光学和受激喇曼散射的物理研究等方面得到了较为广泛的应用。此外,还常被用作染料激光器的泵浦源,是激光技术中常用的器件之一。

## 一、约束等离子体的管壁材料——氧化铍放电管

### 1. 氩等离子体中的电子温度及对管壁材料的要求

从图1可以看出,由氩原子基态 $3p^6$ 到氩离子基态 $3p^5$ 的电离能约15.75电子伏,由氩离子基态 $3p^5$ 激励到激发态 $3p^4 4p$ 需要大约20电子伏,因此要使电子与氩原子碰撞使之电离,或者电子与氩离子碰撞激励到激发态,均需要电子具有足够大的能量,换句话说,要求有足够高的电子温度。

根据气体放电的Tonks-Langmuir低气压正柱理论,电子温度由下式确定<sup>[1]</sup>:

$$\left(1+2\frac{KT_e}{eV_i}\right)^{-1} \exp \frac{eV_i}{KT_e} = 62.8aV_i\sqrt{M}\frac{N_g}{N_L}R \quad (1)$$

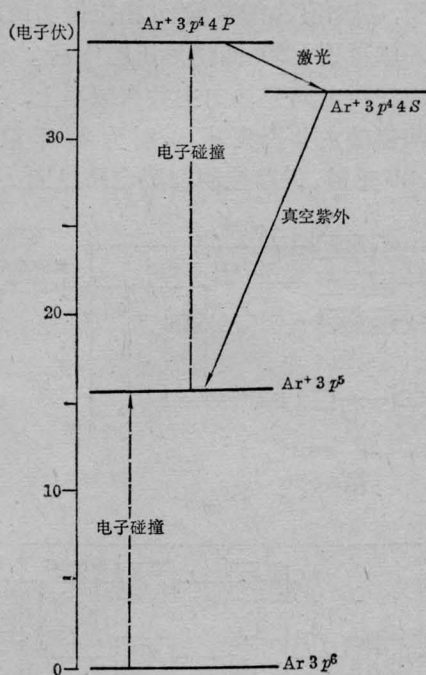


图 1

其中  $T_e$ ——电子温度,  
 $V_i$ ——气体电离能,  
 $N_g$ ——放电管中的气体密度,  
 $N_L=3.54 \times 10^{16}$  厘米<sup>-3</sup> (理想气体在气压为1托,温度为273K情况下的气体密度),  
 $R$ ——放电管半径,

\* 收稿日期: 1977年10月25日。

$a$ ——在气体密度为  $N_L$  时的气体离子化系数,

$M$ ——分子量,

$K$ ——玻尔兹曼常数,

$e$ ——电子电荷。

对于 Ar,  $a=0.71$ ,  $M=39.94$ ,  $V_i \approx 16$  电子伏, 将这些数据代入(1)式, 即可得出电子温度  $T_e$  与  $\frac{N_g}{N_L} R$  之间的函数关系, 如图 2 所示。

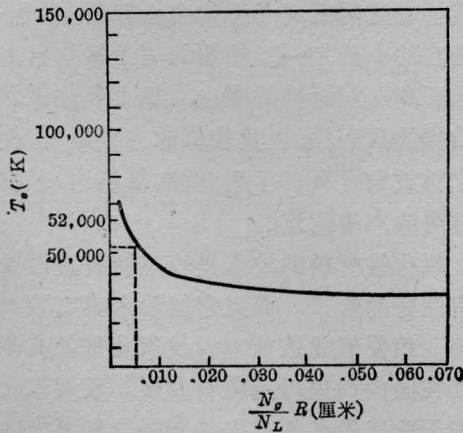


图 2 电子温度与  $\frac{N_g}{N_L} R$  间的函数关系

在典型的氩离子激光器中取

$$\frac{N_g}{N_L} R = 5 \times 10^{-3} \text{ 厘米}$$

数值, 在图 2 中对应于该值的电子温度大约为 52000 K。氩离子激光器中这样高的电子

温度采用低气压放电是合适的。实际上, 氩离子激光器的工作气压一般均在 1 托之下。低的工作气压给出了单位体积内较少的氩原子数。为了增加氩原子的电离几率和氩离子的激发几率, 就必须相应提高放电管中的电子密度。因此, 氩离子激光器采用了大电流弧光放电。在氩离子激光器中, 工作电流密度可以超过 100 安/厘米<sup>2</sup>, 甚至到 1000 安/厘米<sup>2</sup>。放电管管壁的功率耗散可超过 200 瓦/厘米, 而轴心的等离子体温度可达 3000 K<sup>[2]</sup>。这就对管壁材料提出了苛刻的要求, 要求材料具备耐高温、抗热冲击强度高、导热性能好、溅射小、气体清除率低等性能。氩离子激光器通常采用的放电管材料有石英、分段石墨和金属、氧化铍陶瓷等。其性能比较见表 1。

## 2. 氧化铍放电管

从表 1 可见, 氧化铍材料具有比较突出的优点。它的熔点较高 (2573°C), 属于耐高温陶瓷; 抗热冲击强度也较高 (11.7), 与石英材料相当, 因此可以承受急剧的温度变化而不易炸裂。在我们的实验中, 在内径为 3.8 毫米的氧化铍管内, 有的管子工作在 60 安培的电流下 (电流密度相当于 500 安培/厘米<sup>2</sup>), 未发现氧化铍管炸裂损坏。氧化铍材料还具有良好的导热性能。其导热率为 0.525 卡/厘米·秒·°C, 与金属铝的导热率相当。

几种放电管材料的性能表

材 料	导 热 率 (卡/厘米·秒·°C)	热 胀 系 数 °C <sup>-1</sup> (0~100°C)	热 冲 击 (卡/秒·厘米)	熔 点 (°C)	电 阻 率 (欧姆·厘米)	气 体 清 除 率 (毫托·升/小时)
石 英	0.0035	$0.55 \times 10^{-6}$	13	~1600	$>10^{13}$	10~20
氧 化 铝	0.054	$6.9 \times 10^{-6}$	1.5	~2100	$>10^{13}$	
氮 化 硼	0.023~0.145	$0 \sim 2.3 \times 10^{-6}$		~2800	$1.2 \times 10^{12}$	
氧 化 铍	0.525	$5.4 \times 10^{-6}$	11.7	2573	$>10^{13}$	0.1~0.15
石 墨	0.3	$3.6 \times 10^{-6}$	310	~3500	$3 \times 10^{-6}$	0.4~3
活 性 炭	0.01~0.02	$2 \times 10^{-6}$			$1 \sim 5 \times 10^{-6}$	
钼	0.346	$4.9 \times 10^{-6}$		2622	$5.7 \times 10^{-6}$	
钨	0.476	$4.45 \times 10^{-6}$		3382	$5.3 \times 10^{-6}$	
铜	0.92	$16.4 \times 10^{-6}$		1083	$1.5 \times 10^{-6}$	
铝	0.57	$23.5 \times 10^{-6}$		660	$2.6 \times 10^{-6}$	

氧化铍材料优良的导热性能,使得在大电流密度下氧化铍管内壁仍具有较低的温度。氧化铍放电管内壁温度可以作如下估算。根据热导率定义,有:

$$\frac{dQ}{dt} = -K \frac{dT}{dr} S \quad (2)$$

其中  $K$ ——热导率,

$\frac{dQ}{dt}$ ——热流,

$S$ ——热流面积,若以单位长度氧化铍管热传导来考虑,  $S=2\pi r$ ,

$\frac{dT}{dr}$ ——径向温度梯度。

将(2)式稍作改写,得:

$$dT = -\frac{1}{KS} \frac{dQ}{dt} dr = -\frac{1}{2\pi Kr} \frac{dQ}{dt} dr \quad (3)$$

氧化铍管内半径为  $r_1$ , 外半径为  $r_2$ , 内壁温度为  $T_1$ , 外壁温度为  $T_2$ 。在一定的放电电流下,  $dQ/dt$  可视为常量, 对(3)式积分后可得:

$$T_2 - T_1 = -\frac{1}{2\pi K} \frac{dQ}{dt} [\ln r_2 - \ln r_1]$$

所以, 内壁温度

$$T_1 = T_2 + \frac{1}{2\pi K} \frac{dQ}{dt} [\ln r_2 - \ln r_1] \quad (4)$$

在我们采用的放电管尺寸下,  $r_1=0.19$  厘米,  $r_2=0.39$  厘米,  $K=2.2$  瓦/厘米 $\cdot$ °C。在 40 安培电流下, 单位长度(1 厘米)的热流  $\frac{dQ}{dt} \approx 200$  瓦, 令外壁温度为水的沸腾温度, 即  $T_2=373$  K, 代入(4)式后, 得  $T_1 \approx 383$  K。

对于典型的石英放电管氩离子激光器, 在 20 安培电流下, 耗散功率约为 80 瓦/厘米, 而内壁温度为 900 K<sup>[6]</sup>。氧化铍放电管与石英放电管以及石墨放电管相比, 具有较低的内壁温度。

由于氧化铍管具有较低的内壁温度, 因

此放电过程中在管壁附近具有较高的气体密度。

在管壁附近气体密度的升高, 使得管壁附近的离子具有较短的平均自由程。根据  $\lambda_w = \frac{\lambda T_1 P}{T_0 P_1}$ <sup>[3]</sup>, 计算出离子在管壁附近的平均自由程  $\lambda_w$  约为 0.1 毫米(其中  $T_0=273$  K,  $P=760$  托, 在 273 K, 760 托气压下, 平均自由程  $\lambda=6.32 \times 10^{-8}$  米, 氧化铍管内壁温度  $T_1 \approx 383$  K, 充气压强  $P_1=0.7$  托)。这比之石英管管壁附近离子平均自由程要短得多, 只是它的十分之一。较短的离子平均自由程减低了离子对管壁的轰击, 加上氧化铍管本身结构的致密性, 以及较低的内壁温度, 使得氧化铍放电管具备了耐腐蚀、低溅射、较低的气体清除率等优点。

氧化铍材料的缺点是较难制备直而长且气密性好的管子, 而且它的粉末具有较大毒性等, 致使氧化铍放电管及氧化铍氩离子激光器在国内尚未得到应有发展。发展氧化铍氩离子激光器必须首先是制备合乎要求的氧化铍管。

## 二、结构及工艺

氧化铍氩离子激光器有氧化铍放电管直接水冷结构和金属外套氧化铍内衬结构。

我们采用了单根氧化铍放电管直接水冷结构。激光器的基本构造如图 3 所示。氧化铍管的两端经过金属化之后分别与无氧铜阳极和无氧铜阴极外壳作气密封接。为了降低氧化铍管阳极端和阴极端的电位梯度, 以减弱离子对放电管喉部的轰击, 我们把氧化铍管阳极端内部磨成深约 1 厘米左右的锥形, 而在氧化铍管的阴极端对接上一氧化铍喇叭口。为了减少焊缝, 氧化铍喇叭口置于阴极外壳内。采用间热式钨钨阴极(外直径 3.0 厘米, 内直径 2.8 厘米, 长约 3 厘米), 外加一铝屏蔽罩, 阴极用两根钨棒支撑并焊在阴极外



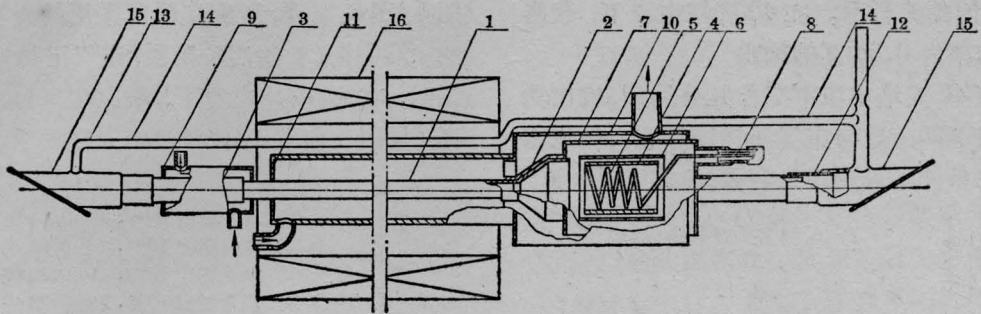


图3 氧化铍-金属结构氩离子激光器示意图

1—氧化铍放电管；2—氧化铍喇叭口；3—无氧铜阳极；4—钨钨阴极；5—灯丝；6—阴极屏蔽罩；7—无氧铜阴极外壳；8—灯丝接线柱；9—阳极水冷套；10—阴极及放电管水冷套；11—放电管水冷套挡板；12—科伐圈；13—回气管；14—钼丝网；15—布儒斯特窗管；16—磁场

壳内。灯丝一端与阴极外壳相连，和阴极构成一等位体，灯丝另一端由金属-氧化铍接线柱引出。

水冷系统全部是铜结构，采用两套水冷系统。阴极外壳与氧化铍管用同一水冷系统冷却，阳极单独水冷，以保证阳极与阴极之间的电绝缘。这样就可以不用去离子水而用普通自来水冷却。为了避免由于水冷管与氧化铍管热膨胀的不同而产生应力，在水冷结构中，阴极外壳水冷套与氧化铍水冷套间采用波纹管连结。在氧化铍管水冷套外再加一黄铜套管支撑，以使氧化铍管免受应力。我们也曾做过省去波纹管的实验，即用一紫铜片焊接在氧化铍管与水冷套间（图3中11）作为氧化铍管水冷套挡板，依靠该铜片的弹性，以消除氧化铍管与水冷套间的热膨胀不同而产生的应力。省去波纹管和黄铜支撑套管后，经实验证明效果良好。

氧化铍与金属、金属与金属之间均采用银铜焊接。首先将氧化铍管两端待焊处用钼锰法金属化后镀镍。而后分别与阳极及阴极外壳焊接（在早期研制中，在阳极及阴极外壳与氧化铍管间焊接时采用了科伐过渡），只要与氧化铍管焊接处的阳极、阴极外壳铜壁较薄（一般约为0.3毫米）且焊接时外绕钼丝若干圈，以限制铜的膨胀，一般焊接均可成功，无需加科伐过渡。在焊接时要注意阳极、阴

极外壳与氧化铍管的同轴性。为了防止氧化，全部焊接都是在氢气气氛中进行的。

回气管与布儒斯特窗管是玻璃的。玻璃部分与金属之间的封接是通过科伐环过渡实现的。在封接玻璃布儒斯特窗管时要校正布儒斯特角以及注意扭角。

### 三、实验结果

在内径3.8毫米，长36厘米氧化铍放电管的氩离子激光器中测量了输出功率。

所采用的磁场螺线管是由直径1.2毫米的高强度漆包线绕制的。线圈匝数为1193圈。螺线管长度为34厘米。在实验中线圈通电电流为13安培，根据公式

$$H = \frac{4\pi IN}{L} \times 10^{-3} \quad (5)$$

其中  $H$ ——磁场强度(高斯)；  
 $I$ ——线圈中电流(安培)；  
 $L$ ——螺线管长度(米)；  
 $N$ ——线圈匝数；

计算磁场强度约为540高斯。

谐振腔为平凹腔，腔长1米，全反射镜为一平面镜，输出镜为一凹面镜，曲率半径2米，多层介质膜对4880埃的反射率为90%。充气压强约为0.64托，阳极与阴极间电压为180伏。测量了输出功率与放电电流之间的

关系,如图4所示。在40安培电流下,获得了总功率为0.86瓦的输出。

在40安培电流下工作几分钟后,输出功率明显下降,这与布儒斯特窗片在大电流密度放电条件下急剧污染有关。

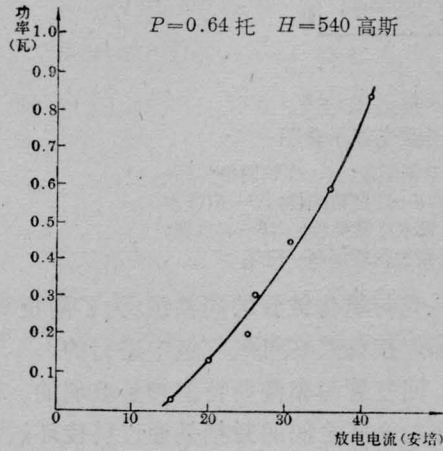


图4 激光输出功率与放电电流的关系

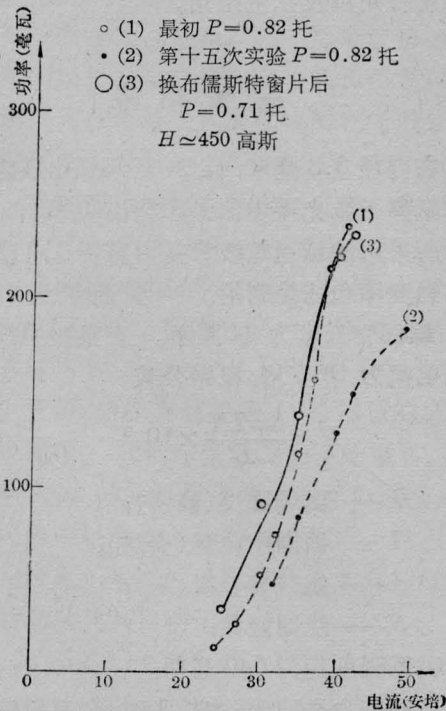


图5 不同实验次数下输出功率与放电电流间的关系

在同样内径,长为22厘米的氧化铍放电管氩离子激光器中所进行的实验,结果示于

图5、图6、图7。所有实验所采用的磁场强度约450高斯。初始实验阶段,充气压强为0.82托时,在40安培电流下,输出功率为230毫瓦(见图5曲线1),经过十五次放电实验之

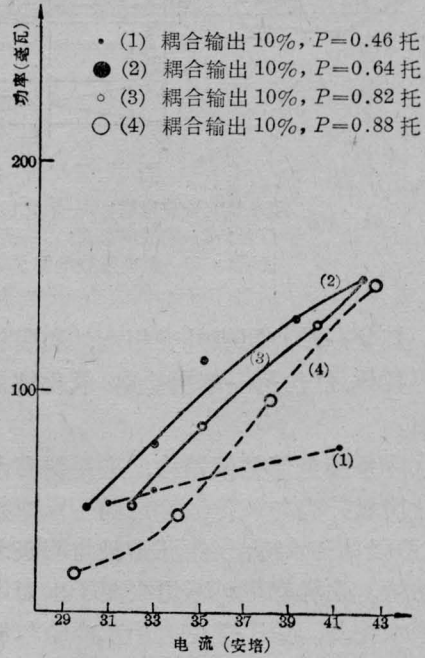


图6 不同气压下输出功率与放电电流间关系

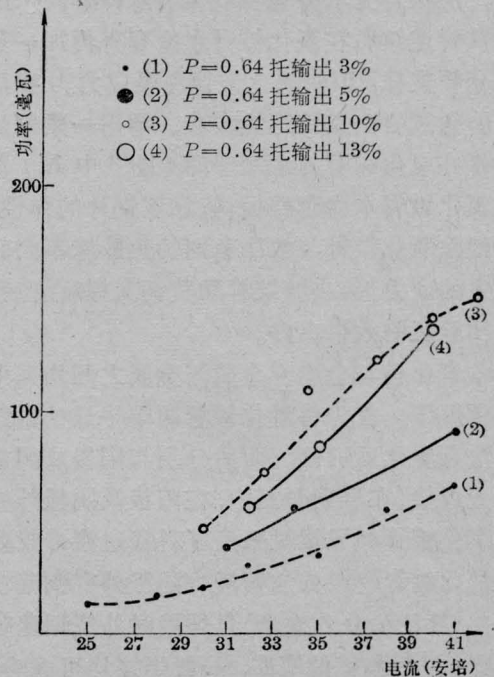


图7 不同耦合输出功率与放电电流间的关系

后,在同样充气压强下进行测量,放电电流仍为40安培,输出功率下降为130毫瓦,为原输出功率的57%(见图5曲线2)。此后,取下原布儒斯特窗片,换上新的窗片,输出功率便得到恢复(见图5曲线3),在40安培放电电流下输出为227毫瓦。由此可见,放电过程中的布儒斯特窗片的污染对输出功率有很大影响。关于布儒斯特窗片的污染问题,G. Demars等人作过实验研究<sup>[4]</sup>,输出功率随窗片污染而下降的速率是以分钟来计算的。由于放电过程中电极及放电管的溅射等原因使窗片上形成一层薄的吸收膜,它只要吸收光功率的很小一部分便可引起窗片的热畸变,使激光功率显著下降。在我们的实验中,关于布儒斯特窗片的污染源,初步分析是:(1)为了焊接工艺上的方便,阳极与阴极外壳采用了无氧铜材料,已知道铜的溅射阈值能量较低,约为50~70电子伏<sup>[5]</sup>,放电过程中将会有铜的溅射发生。(2)钨钨阴极的溅射。(3)由于在工艺过程中未找到适当熔点的焊料,以致水冷系统采用了锡焊,因而焙烘除气温度较低(200°C以下),在放电过程中将会有杂质、杂气释放到工作气体中。这样不仅成为窗片污染的原因,而且也会影响激活介

质的粒子数反转。因此为了提高输出功率并减缓输出功率的下降,在激光器制作中必须选择适当材料,改革工艺,实现400°C以上的整体焙烘。同时采取其他相应措施(诸如窗口远离放电区、射频放电、辅助电极辉光放电等),以尽量避免窗片污染。

用反射率为90%的输出镜,对几种不同充气压强下的输出功率进行了测量比较,结果示于图6,其中以0.64托的输出功率较大,0.46托的结果较差。一般充气压强均选在0.7托左右为宜。

图7给出了在0.64托气压下几种输出耦合的实验结果的比较。其中以10%的耦合输出具有较高的输出功率。

### 参 考 文 献

- [1] K. G. Hernqvist, J. R. Fendley, Jr.; *IEEE J., Quantum Electron.*, 1967, **QE-3**, No. 2, 66.
- [2] J. C. L. Cornish, A. Vaitlaud; *Scientific Instrument*, 1973, **6**, No. 9, 880~883.
- [3] *Radio and Electron.*, 1970, **39**, No. 2, 97~103.
- [4] G. Demars, M. Seiden et al.; *IEEE J., Quantum Electron.*, 1968, **QE-4**, No. 10, 631~637.
- [5] G. K. Wehner; *Phys. Rev.*, 1954, **93**, 633~634.

(上接第28页)

图4(b)是染料蒸气激光器实验装置,当测得总增益大于总的损耗时,装上反射镜形成激光腔,可做激光振荡实验。图4中省去了储能平板电容器和辅助气体存储装置。

我们只讨论了放电泵浦染料蒸气激光器,实际上与用电子束泵浦原理上是类似的,它们正处在原理性实验阶段,采用什么途径获得激光振荡是研制高效率大功率染料调频

激光器的重要一步。我们的讨论只是其中的一种途径。

### 参 考 文 献

- [1] C. S. Willett.; "Introduction to gas lasers: Population inversion mechanisms." (1974, new york).
- [2] P. W. Smith et al., *IEEE J., Quantum Electron.*, 1976, **QE-2**, No. 9, 539.