

# 低噪音氦-镉激光器

上海海光玻璃制品厂  
上海市激光技术试验站 三结合研制组

人们在研究脉冲镉蒸汽激光器的实践中,发现以氦作为该激光器的缓冲气体有特殊作用。氦亚稳态和氦离子与镉原子碰撞发生彭宁电离与转荷过程是该激光的主要激发过程。这种激光器可以连续运转。

轴向连续运转的氦-镉激光是由彭宁电离激发引起的,其截面为  $6.5 \times 10^{-15}$  厘米<sup>2</sup>,激光上能级  $5s^2 D_{5/2}$  的寿命为 0.5 微秒,比下能级  $2p^3 P_{3/2}$  的寿命长 230 倍,因而在二能态间很容易引起集居数反转<sup>[1]</sup>。

采用同位素  $Cd^{114}$  的氦-镉激光器可获得 50 毫瓦/米以上的功率输出。实验表明,加热氦-镉激光管,在 45 厘米长的放电通道中获得 20 毫瓦以上的功率输出,但噪音很大,达 15% 以上。并且还有同样数值的低频功率波动,这使氦-镉激光器的应用受到了很大限制。

为了扩大氦-镉激光器的应用范围,必须探索低噪音激光管的结构。有人曾经采用回气通道<sup>[2]</sup>、镉环<sup>[3]</sup>、隔离管结构<sup>[4]</sup>和多层栅网结构<sup>[5]</sup>等办法降低噪音。但是,外回气通道不能完全消除气压梯度,效果不佳。而镉环管在充气压力低于最佳气压很多的状态下工作时,噪音虽较小,但随着镉环熔化堵塞边上的气隙,噪音将上升,并且各段毛细管对准困难,所以也不是最佳方法。而隔离管结构类似于回气通道管,加工工艺与除气都困难,效果也不很佳。金属网结构对平衡气压是很好的,但加工工艺及金属网去气困难,尚需外加热炉。

我们设计和制造了几种新结构的低噪音管,这些结构的噪音比镉环管低,最佳气压下运用信噪比为 0.01。加工工艺方便,不需外加热炉。如 40 厘米放电管可产生 10 至 20 毫瓦的 4416 埃激光输出,寿命可达数百小时。

氦-镉激光管产生噪音的原因,有一些人认为是由于彭宁电子与亚稳态氦原子来回交换能量引起的,也可能由等离子体振荡引起<sup>[6]</sup>。得到公认的一种理论认为,等离子体振荡是氦-镉激光管噪音的主要原因<sup>[7]</sup>。我们认为,这种理论仅说对一部分,等离子体振荡引起氦-镉激光规则频率的噪音,如 10 兆周峰值。但是,不规则频率的噪音主要是由于压力梯度引起的,而压力梯度则由电泳效应引起的。本文提出了一个新的氦-镉激光管噪音理论并指出克服噪音的方法。

氦-镉激光器可用于诊断、治疗、光化学、喇曼光谱分析、全息照相、激光传真、制板、显示和农业育种等。新的低噪音结构氦-镉激光器试制成功是开门办科研,以工厂为基地,实行三结合所取得的成果。

## 一、氦-镉激光器中的噪音

等离子体振荡往往是各种噪音的一个来源,如宇宙噪音、微波噪音等等。因此,有人就自然地用等离子体振荡解释氦-镉激光器的噪音<sup>[8]</sup>。等离子体振荡的离子振荡频率为

$$\nu_+ = \left( \frac{n_{\text{Cd}}^+ e^2}{nm_{\text{Cd}}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $e$  为电子电荷,  $m_{\text{Cd}}$  为镉原子质量,  $n_{\text{Cd}}^+$  为镉离子波度, 约为  $10^{14}$  厘米<sup>-3</sup>。

$\nu_+$  近似 10 兆周, 正好位于氦-镉激光的一个噪音峰值。因此, 等离子体振荡是产生氦-镉激光噪音的一个因素, 但不是全部原因。在氦-镉激光器中, 除了 10 兆周、200 千周规则频率的噪音以外, 还有 10~100 千周的非规则频率噪音。用等离子体振荡也不能充分说明噪音与气压和气压梯度的关系。

我们从实践中认识到, 氦-镉激光器的噪音主要是由放电毛细管内气压梯度引起的。为了说明气压扰动如何与激光增益扰动联系起来, 可作如下考虑。

气体激光器的增益可表达为:

$$G = \int_0^L g(\xi) d\xi = \frac{\lambda^2}{8\pi \Delta\nu \tau_{\perp}} \left( \frac{4 \ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \left\{ \int_0^L n_{\perp}(\xi) d\xi - \frac{g_{\perp}}{g_{\text{F}}} n_{\text{F}} L \right\} \quad (2)$$

式中,  $L$  为毛细管长,  $\xi$  为沿轴的座标;  $\lambda$  为激光波长,  $\Delta\nu$  为多普勒线宽,  $\tau_{\perp}$  为上能级寿命,  $g_{\perp}$  与  $g_{\text{F}}$  为激光上、下能级的统计权重,  $n_{\perp}$  和  $n_{\text{F}}$  为上、下能级的集居数浓度。

彭宁电离过程是氦-镉激光的主要激发过程, 因此未饱和集居数浓度  $n_{\perp}(\xi)$  可表达成:

$$n_{\perp}(\xi) = \sigma_p \tau_{\perp} n_m(\xi) n_{\text{Cd}} \sqrt{\frac{8kT(m_m + m_{\text{Cd}})}{\pi m_m m_{\text{Cd}}}} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_p$  为彭宁电离截面,  $n_{\text{Cd}}$  为镉离子浓度,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $m_m$  和  $m_{\text{Cd}}$  分别为氦原子和镉原子的质量,  $T$  为放电气体温度,  $n_m(\xi)$  为亚稳态氦原子的浓度。

亚稳态氦原子通过电子碰撞激发, 又通过双极扩散和彭宁电离过程消激发, 平均寿命为:

$$\tau_m = \left[ \frac{D_a}{A^2 P(\xi)} + \sigma_p n_{\text{Cd}} \sqrt{\frac{8kT(m_m + m_{\text{Cd}})}{\pi m_m m_{\text{Cd}}}} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中,  $A$  为扩散长度, 对圆柱放电管,  $A = \frac{R}{2.405}$ ,  $D_a$  为扩散系数。计算表明, 氦-镉激光器中氦亚稳态  $2^3S$  的浓度的寿命主要决定于彭宁电离截面, 寿命由没有彭宁效应的  $10^{-5}$  秒降为  $10^{-6}$  秒。由电子激发率决定亚稳态浓度为:

$$n_m(\xi) = \frac{4\pi}{kT_a} \frac{2I_m}{m_e^2} P_{\text{He}}(\xi) n_e(\xi) \int_{\varepsilon_m}^{\infty} f_e(\varepsilon) \varepsilon \sigma_m(\varepsilon) d\varepsilon = n_e(\xi) F(P_{\text{He}}(\xi), R) \quad (5)$$

式中:  $\sigma_m(\varepsilon)$  为电子激发函数, 是电子能量函数,  $\varepsilon$  为电子能量,  $m_e$  为电子质量,  $f_e(\varepsilon)$  为电子能量分布函数,  $n_e$  为电子浓度,  $T_a$  为气体温度,  $P_{\text{He}}(\xi)$  为  $\xi$  处氦气压对上式取对数微商得到。

$$\frac{\Delta n_m(\xi)}{n_m(\xi)} = \frac{\partial F}{\partial P_{\text{He}}} \frac{\Delta P_{\text{He}}(\xi)}{F(P_{\text{He}})} + \frac{\Delta n_e}{n_e} \quad (6)$$

以上表示亚稳态原子浓度的扰动, 将引起激光上能级集居数的扰动, 以及激光增益的扰动。亚稳态氦原子的扰动来自两个部分: 第一部分是压力扰动; 第二部分是电子浓度的扰动。

电子浓度的扰动可以由等离子体振荡引起，构成规则频率的噪音。而压力的扰动是由电泳效应引起的，产生 10~200 千周低频无规则频率的噪音。

在气体放电中，电子具有较高速度，并向阳极方向迁移，迁移中不断与中性氦原子碰撞，每碰撞一次将  $2m_0\mu_e E$  动量交给中性分子。 $\mu_e$  为电子迁移率， $E$  为电场强度，使中性气体获得沿电场方向的动量，在阴阳极之间建立一个压力梯度  $P_2 - P_1$ <sup>[9]</sup>。

$$P_2 - P_1 = 2.4 \times 10^{-6} \frac{iEL\sqrt{M}}{P_{He}R^4}$$

式中： $i$  为放电电流， $R$  为管径， $M$  为氦的克分子量。

在氦-镉激光管中，气压 7 托， $R$  为 0.1 厘米， $i$  为 0.6 安， $L$  为 60 厘米，可以产生  $P_2 - P_1 \sim 1$  托。

阳极比阴极气压高 1 托，由压力差产生反向的物质流称为布阿色尼衣流。如图 1 所示， $a$  为电泳流， $b$  为布阿色尼衣流， $c$  为二种流的合成。合成流在管壁附近从阴极流向阳极，而在管中心合成流从阳极流向阴极，其间存成一个分界区，流速为零。分界区两边流速反向，分界区中很易引起紊流和压力扰动。

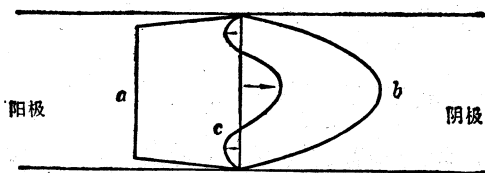


图 1 电泳流与反向流

## 二、管子的设计

由于氦-镉激光器的噪音主要是气压差引起的，因此，消除噪音的任务便归结为消除气压差。

本实验设计了几种新的消除毛细管中气压差的结构。

### 1. 不均匀镉环管

将镉棒锉成环形，放在割断的毛细管之间，依靠放电热量加热，使镉蒸发至工作的气压。镉蒸汽由氦转荷碰撞、彭宁碰撞和电子碰撞电离成镉离子，镉离子沿着场强方向迁移到阴极，因此阴极一边少放一些环，阳极一边多放一些环，其距离从阳极到阴极分别为 5.5 厘米、7 厘米、10 厘米、20 厘米间距放一个环，如图 2 所示。该结构功率已达 14 毫瓦，噪音小于 5%。

不均匀镉环结构比均匀镉环结构放电均匀性好，最后 20 厘米没有镉环处，毛细管还是切断，之间的缝隙保证气体的流通，镉环与玻璃之间也存在供气体流动的隙缝，但隙缝在使用过程中堵塞，气体流动变差，噪音上升。另外要使镉环管工作在低噪音，必须使工作气压保持在 3 托以下。这就是说，输出功率将因低噪音而降低 1/2 以上。我们在 42 厘米长镉环毛细管中于最佳气压下获得 14 毫瓦的 4416 埃激光输出。

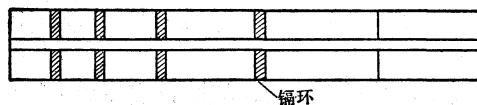


图 2 不均匀镉环管

### 2. 加热低噪音管

我们将国外加栅网的结构作了改进。栅网是为了防止边上打孔处之间放电，而使气流可以通过。我们将边上打孔的毛细管塞进一根匹配的玻璃管中，代替栅网的作用，获得良好的结果，噪音小至 1%。其结构如图 3 所示，每两孔之间相隔 5.5 厘米。该结构的激光功率输出已达 10 毫瓦以上。这种结构比栅网结构优越之处，在于加工工艺简单，且不存在去气的困难。

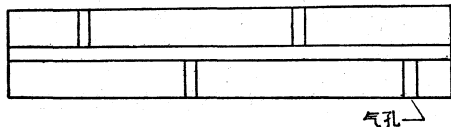


图 3 边孔低噪音管

### 3. 自加热低噪音管

加热低噪音管都需要有外加热的镭源,使用很不方便。为此,对以上结构又做了进一步改进,即将加热低噪音结构与镭环自加热结合起来。使镭环完全集中到阳极一端,代替外加热镭炉,每隔20毫米至30毫米加一镭环共3个环。每个环的外缘开一个缺口,以增加气体的流通,如图4所示。自加热低噪音管输出功率可达11毫瓦,噪音为3%至5%之间。放电有效长度为40厘米。

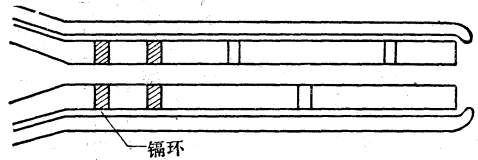


图4 自加热低噪音管

### 4. 镭块低噪音管

镭环管要将毛细管割断,割断的毛细管再塞入一根玻璃管,毛细管之间往往互相挡住一部分光,使激光输出功率降低,为了避免毛细管割断,我们设计了一种新的结构,将镭块塞入开在毛细管边上的孔中代替镭环,再塞入一根相同孔径的玻璃中,如图5所示。该结构已获得多模输出为20毫瓦,单模输出为13毫瓦,放电有效长度为50厘米。这种结构中镭蒸汽均匀,功率大,噪音低。

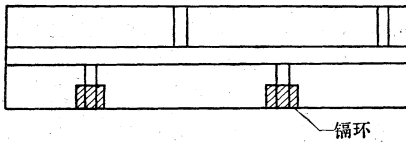


图5 镭块结构管

## 三、各种参量的测量

对以上结构的激光器的各种参数,如噪音、寿命、伏安特性、输出功率与工作气压、放电电流、加热温度之间的关系等实验测定结果如下。

### 1. 噪音

测量发现,结构2、3和结构4的噪音都很低。测量是用直流讯号示波器进行的。由于噪音的存在,示波器的扫描线加宽,加宽值与直流光信号值的比值便是信噪比,结构2在最佳气压下信噪比可达1%。

### 2. 输出功率与工作气压的关系

图6给出三种结构的输出功率与工作气压的特性,这三种管子的管径都是 $\phi 2.1$ 。以非低噪音管最佳工作气压6.7毛为最高,镭环管次之,为5.1毛,低噪音管2、3与镭块结构最佳工作气压都为3.4毛,最低。这说明低噪音管气流流通情况最佳,非低噪音管流通情况最差,镭环管介于两者之间,镭块结构结果与低噪音管非常相似。

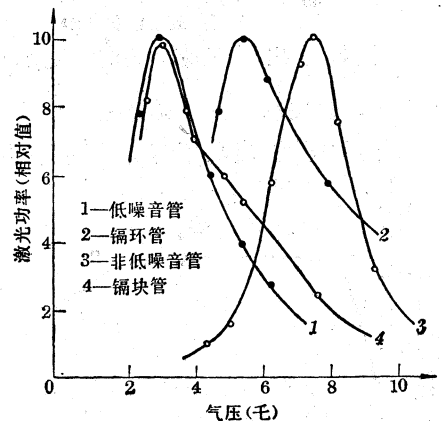


图6 输出功率与工作气压的关系

### 3. 伏安特性曲线

图7为镭环管管压降与放电电流的关系,管压降随放电电流增加直线地下降。这是因为电流增加后,管壁温度上升,镭蒸汽气压逐渐上升,镭是低电离电位元素,电位降随镭原子浓度增加而下降。用伏安特性可以指示镭蒸汽压的浓度。

### 4. 输出功率与放电电流,输出功率与反射镜输出耦合

图8、图9为镭环管激光输出功率与放电电流及反射镜透射率的关系曲线,给出镭环管最

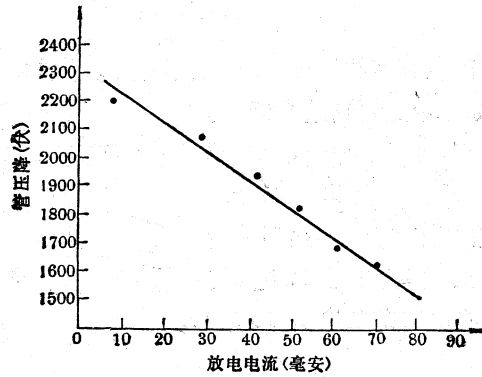


图7 伏安特性曲线

佳放电电流与最佳耦合, 放电电流为 65 毫安, 最佳耦合为 2%。

实验测定表明, 镉环管放电电流比非低噪音管高, 这可能由于放电加热要在一定电流下使管壁达到所需的温度。

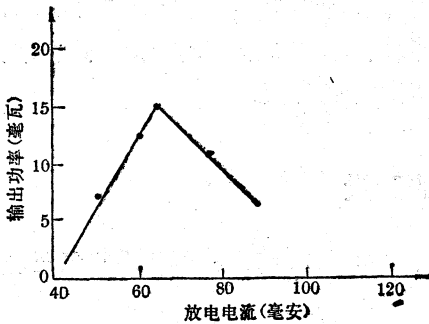


图8 输出功率与放电电流的关系

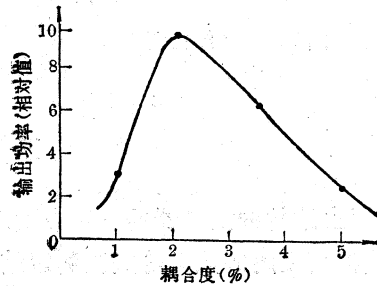


图9 输出功率与耦合度

### 5. 输出功率与加热温度

图 10 为输出功率与加热温度的关系。在保持放电电流恒定的条件下, 使加热低噪音管温度变化, 从 170° 至 350°C。实验表明, 在该温度范围中, 激光输出功率变化不大。相应于该温度下的镉蒸汽压为  $10^{-4}$  至  $10^{-1}$  托。这一特性给镉环不加热结构提供了条件, 在放电电流加热情况下, 管壁温度变化对激光功率输出变化不大, 很易遇到最佳运转状态。

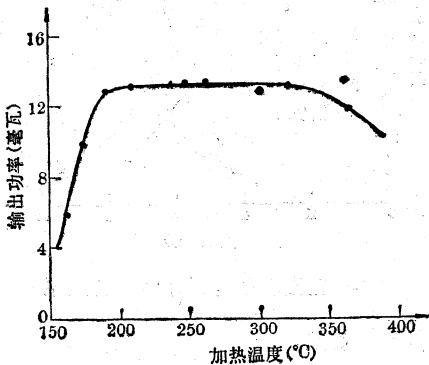


图 10 输出功率与镉炉温度

### 6. 寿命

在激光器运转过程中, 如能使镉蒸汽不污染窗口, 则寿命完全决定于镉的量。为了不污染窗口, 在管子中加了辅助阳极挡住向阴极迁移的镉离子, 使它不致污染阴极一端的窗口, 辅助阳极对激光寿命有很大影响。另外的措施是加了一些挡环, 而放电从挡环的小孔中穿过, 镉是低电离电位物质, 在氦气中放电很易电离成离子, 离子只能沿着电场的方向迁移, 可以使二个窗口不被污染。

氦-镉激光管的寿命决定于加入镉的重量  $W$

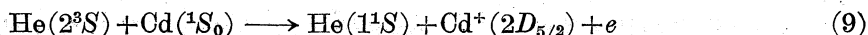
$$\tau_f = \frac{N_0 P_{\text{He}} W}{\pi R^2 \rho N_{\text{Cd}}^+ \mu^+ E}$$

式中:  $N_0$  为阿氏常数,  $\rho$  为镉的比重(8.65克/厘米<sup>3</sup>),  $N_{cd}$  为镉离子浓度, 约为  $10^{12}$  厘米<sup>-3</sup>,  $\omega^+$  为镉离子迁移率, 为  $1.08 \times 10^4$  厘米<sup>2</sup>/秒·伏。从上面计算得到 1 克镉可用 1600 小时, 我们的计算结果与[10]的实验结果基本一致。他们得到 1.5 克镉可用 1000 小时。

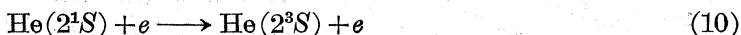
我们经过二百小时以上的寿命实验。从镉的重量减小数值来看, 以上计算结果与我们的实验情况是比较接近的。

#### 四、讨 论

镉蒸汽激光的机理基于彭宁效应和电泳效应。彭宁电离过程主要由  $\text{He}(2^3S)$  参加。



其实, 氦单重亚稳态  $\text{He}(2^1S)$  也参加间接作用。当  $\text{He}(2^3S)$  态被抽空后,  $\text{He}(2^1S)$  态通过与电子碰撞以很大截面产生  $\text{He}(2^3S)$



以上截面可达  $3 \times 10^{-14}$  厘米<sup>2</sup>之大<sup>[11]</sup>。

总之, 从上述情况看来, 镉块结构与自加热低噪音结构的噪音比加热低噪音结构的噪音稍高, 但是去掉了镉炉, 在生产和使用上都是比较方便的, 所以是比较可取的结构。

#### 参 考 资 料

- [1] G. J. Collins; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 4633.
- [2] K. G. Hernqvist; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **18**, 464.
- [3] W. T. Silfvast et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**, 445.
- [4] K. G. Hernqvist; *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1972, **8**, 740.
- [5] K. G. Herhqvist; *RCA, Rev.*, 1973, **34**, 401.
- [6] W. T. Silfvast; *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **27**, 489.
- [7] M. Janossy et al.; *Acta-Physica*, 1972, **32**, 149.
- [8] M. Janossy; *Phys. Lett.*, 1974, **47A**, 409.
- [9] HandBuch. der. Physik, **21**.
- [10] J. P. Goldsborough; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, 159.
- [11] C. K. Rhodes; *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1974, **10**, 153.

## 氮 分 子 激 光 器

戚 霖

(复旦大学光学系)

随着我国激光新技术在工农业生产中日益广泛的应用, 对激光器件的研制提出了更高的要求, 产品的数量远远不能满足日益增长的需要, 品种更落后于生产的发展, 特别在全国人民大办农业的大好形势下, 广大科技人员与贫下中农相结合开展科学种田, 激光育种已初见成效, 同时要求更多品种、不同能量、不同波长的激光器件, 为育种提供更多实验条件。为此, 我