

氦-镉激光器的研制

清华大学绵阳分校激光教研组

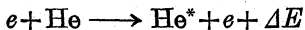
He-Cd 激光器是金属蒸气激光器中结构和工艺简单又较有实用意义的一种。它可产生波长为 4416 埃(深蓝)和 3250 埃(紫外)的连续激光输出^[1]。我们研制了一种单 Cd 源直流电泳式 He-Cd 激光器。激光管的材料为普通的硬质玻璃,使用纯度为 99.99% 的天然镉。4416 埃的输出功率目前可达 25 毫瓦。由于 He-Cd 激光器提供了蓝色的激光输出,而感光材料和大多数探测器在蓝色区域具有较大的灵敏度,因此可将其应用于全息照相存贮、测距、癌细胞检查、喇曼分光、测污和情报传真技术等。并且,He-Cd 激光器第一次用简单的方法提供了连续的紫外激光,故在光化学、喇曼光谱学和光生物学等技术领域也都能广泛应用。

一、激励机理

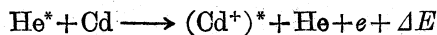
关于 He-Cd 激光器的激励机理,目前尚有争论。普遍认为它是一种所谓彭宁离化效应的结果^[2]。特别是对于采用直流电泳技术的激光器,这种机理似乎是比较适用的。

图 1 是 He 和 Cd⁺ 的部分能级图。由图可知,He 亚稳态原子的能量约为 12 电子伏,而 Cd 的电离电位为 8.99 电子伏,即比 He 的亚稳态原子的能量低得多。因此,镉原子很容易通过亚稳态的氦原子相碰撞而被电离。

所谓彭宁离化效应,可以这样描述:电子将 He 原子从基态激发到 2¹S 和 3³S 亚稳态,即



然后,亚稳态 He 原子与中性 Cd 原子碰撞,并使之激励到 Cd⁺ 的激发态 5S² 2D_{5/2} (即激光上能级)。这种碰撞也称为彭宁碰撞,它属于第二类非弹性碰撞,即



被电离出来的电子带走了(Cd⁺)^{*}能级与 He 亚稳态之间的能量差。

另外,从能级寿命来看,He 亚稳态的寿命很长,约为 10⁻⁶ 秒,这对于激励 Cd 是有利的。Cd⁺ 的 5S² 2D_{5/2} 能级的寿命约为 7.8 × 10⁻⁷ 秒,而 5P² P_{3/2} 能级的寿命约为 2.2 × 10⁻⁹ 秒,相差约两个数量级。这样就可以在这两个能级之间维持粒子数反转。一旦建立合适的谐振腔,

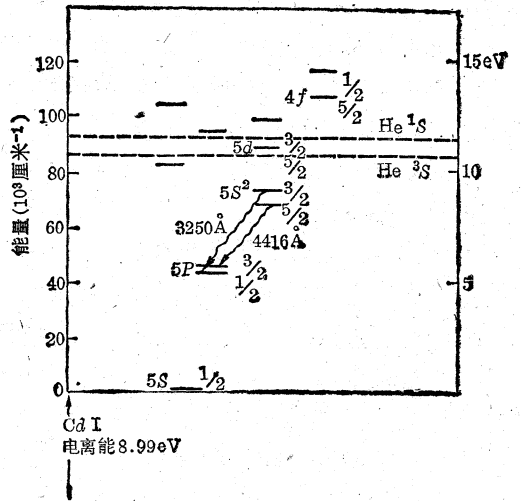


图 1 He 和 Cd⁺ 的部分能级图

便可产生 4416 埃的激光输出。3250 埃紫外谱线是 Cd^+ 的 $5S^{22}D_{3/2}$ 和 $5P^1P_{1/2}$ 能级间产生的。

应该指出, 彭宁碰撞并不是在任何两种原子之间都可以发生的, 而只是在某些特定的原子间才能发生, 例如 He 原子和 Cd、Zn、Sn 等就是其中的一类。用这些金属蒸气作为工作物质都已分别获得了激光输出。它们都属于金属蒸气激光器。

二、激光管结构

我们研制的激光管结构如图 2 所示。激光管采用 11# 硬质玻璃。阳极 of $\phi 2$ 毫米的钨杆, 阴极为铝制空心圆筒。毛细管长度 60~100 厘米, 孔径为 1.5~3.0 毫米。

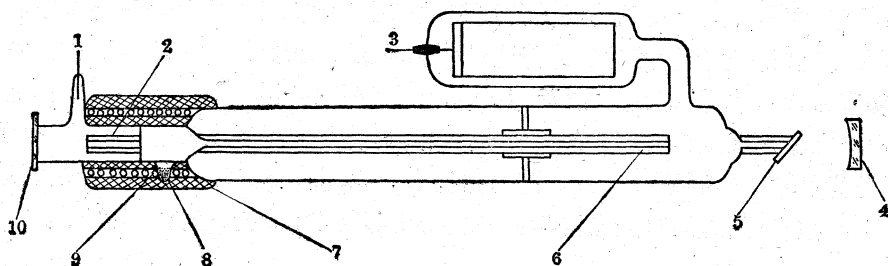


图 2 单汞源直流电泳式 He-Cd 激光管结构示意图

1—阳极; 2—电泳限制段; 3—阴极; 4—输出反射镜($R=1.6$ 米); 5—布氏窗; 6—毛细管;
7—石棉保温层; 8—汞源; 9—加热炉丝; 10—反射镜($R=\infty$)

在阳极端附近有一个汞池, 内盛高纯汞粒。在汞池的玻璃管外用电炉丝加热, 使汞气化。在电炉丝外面用石棉绝热保温。在阳极和汞池之间有一个电泳限制段。

激光器的结构设计和制造的关键在于如何使金属蒸气沿毛细管获得空间与时间上的均匀分布, 以及防止汞蒸气对窗片的污染。

固态的汞在真空中加热到 164°C 时, 就升华成蒸气。汞蒸气源源不断地从汞池向放电区域扩散。随着汞池温度的增加, 汞蒸气密度也就越来越大。在放电区域, 由于彭宁离子化效应, 汞原子被氦亚稳态原子所电离。在电场的作用下, 汞离子从阳极向阴极流动。这个过程称为电泳。由于电泳效应, 就通过毛细管形成一个汞蒸气的连续流动, 为实现激光输出提供了工作物质。最后, 汞蒸气在阴极端的毛细管出口处, 冷凝在外套管的管壁上。为了使汞蒸气在电泳传输的过程中不致冷凝在毛细管内壁上, 必须使毛细管的温度高于汞的冷凝温度。如果毛细管外没有外套管, 为了使放电热不致于损失, 使毛细管保持较高的温度, 则需在毛细管外附加绝热层。我们采用加外套管的结构, 不加绝热层, 当放电电流大于 60 毫安时, 依靠放电热就可以使毛细管温度处于汞的冷凝温度以上。

为了使汞蒸气不致冷凝在汞池附近的管壁上, 加热电炉必须复盖从电泳限制段到毛细管入口处的整个汞池区域。汞池的深度保证在 10 毫米左右, 直径 15 毫米左右。这一方面是为了使汞池温度不致受放电热的影响, 而单独由外部加热电炉来控制。另一方面也是为了在排气过程中放电清洗时, 放电路径不经过金属汞, 而避免对汞的污染。汞池位置距离放电毛细管越近越好。距离太远, 汞蒸气将冷凝在管壳上。

He-Cd 激光器工作过程中, 汞蒸气的扩散会造成对布氏窗的污染。电泳限制段就是为了

防止这种污染而设置的。由于电泳限制段内径小, 电流密度大, 当镉蒸气向阳极端扩散时, 就在限制段内被电泳作用所阻止, 而迫使镉趋向阴极, 从而使镉的漏出率大大减小。漏出率的大小由限制段的内径和长度所决定。我们一般取内径比毛细管内径大 1 毫米, 长度为 3 厘米, 这时镉的漏出率可以降到十分小。有效地防止了对窗片的污染。

在激光管的阴极端, 紧接着放电毛细管的是大直径的外套管, 它的温度低于镉的冷凝温度。被电泳抽运过来的镉蒸气就在这里冷凝。同时, 为了进一步减少未被冷凝的镉蒸气连续向阴极端窗片的扩散, 我们在外套管上先接一段细管, 然后再接厚壁贴片管。激光管的这种结构就使镉蒸气被限制在从阳极到阴极的放电区内, 有效地防止了它对镉窗片或介质膜片的污染, 从而提高了激光管的工作寿命。

放电毛细管的选择对激光管的输出功率影响很大。为了保证镉蒸气密度沿放电管均匀分布, 要求毛细管直径均匀、直线性好。为了保证这一点, 毛细管需要用内调焦平行光管仔细检查, 然后用经过校直的钢丝加金钢砂研磨内孔, 以消除局部弯曲或不均匀性。另外, 由于 He-Cd 激光器工作电流较大(约 100 毫安左右), 所以毛细管应用热形变小的材料(如 GG17 玻璃)。同时注意毛细管支承点的位置(我们选在管长的 $1/3$ 处)。

在激光管正常运转时, 镉蒸气从阳极向阴极的流动率约为 $1\sim 2$ 毫克/小时^[3]。我们在镉池内放入 $1\sim 2$ 克的镉粒, 就可以维持运转 1000 小时。

三、实验方法

在 He-Cd 激光器的激励条件下, 4416 埃的受激辐射与自发辐射具有相同的行为。在实现激光振荡之前, 可以通过测量激光管侧面光 4416 埃谱线自发辐射的强度来判断激光管增益的大小。因此, 对于某一确定结构和几何尺寸的激光管, 为了确定其工作参数, 如放电电流、氦气压强、镉源温度等的最佳值, 我们采用了图 3 所示的实验装置: 从激光管侧面自发辐射的光, 经过透镜聚焦后进入单色仪。由单色仪选出 4416 埃的光谱线, 然后被光电倍增管放大, 再由检流计指示光强的相对值。改变放电参数, 使 4416 埃自发辐射的强度最佳, 就可以由此确定激光管工作参数的最佳值。

在纯 He 放电时, 激光管的放电颜色呈现出氦放电的特征颜色——橙黄色。这时, 经过单色仪, 我们只能看到氦的各条光谱线(4388 埃、4471 埃、4713 埃、4922 埃、5016 埃、5047 埃、5418 埃、5876 埃、6678 埃和 7065 埃等)。随着镉源温度的升高, 镉被气化进入放电管, 这时放电毛细管的

颜色开始由黄变白。我们可以看到, 除了氦的谱线之外, 还出现了镉原子的和镉离子的谱线(镉原子的有 4678.2 埃、4799.9 埃、5085 埃、6438.5 埃等, 镉离子的有 4416 埃、5337 埃、5378 埃、6354 埃、6725 埃等)。镉源温度继续升高, 氦的谱线强度就逐渐减弱, 而镉原子的谱线强度逐渐增强。镉离子的 4416 埃谱线强度在某一镉源温度时达到最大值。这时, 可以看到氦、镉、镉离子的各条谱线同时存在, 放电毛细管完全呈现白色。在实验中, 放电毛细管这种颜色的变化也可以作为最佳工作条件的粗略判断。如果镉源温度再升高, 氦的谱线逐渐消失, 镉原子谱线仍然单调地急剧增强, 而镉离子 4416 埃谱线则逐渐减弱。这时毛细管就呈现出镉

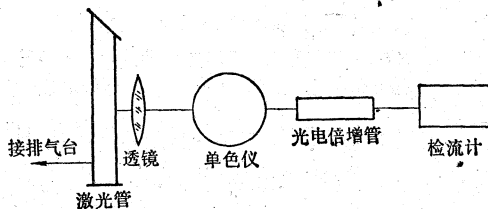


图 3 确定激光管工作参数最佳值的实验装置

原子的特征放电颜色——蓝色。这说明,由于镉源温度过高,镉蒸气密度太大,电子直接和镉原子碰撞而使之激发的几率大大增加,从而使电子温度降得过低。这一点可以从管压降的显著下降证实。电子温度的降低,使氮原子激发到亚稳态的几率就减少。这样,就引起了氮的亚稳态粒子数的减少,因而氮的亚稳态原子与镉原子碰撞而使之激发到镉离子的激光上能级的彭宁效应也就随之减弱。这种情况必须避免,因为它对激光管的工作寿命带来很大的危害。这是由于中性镉原子是不受电场的约束的,它将在激光管内向四处扩散,从而造成对布氏窗或膜片的严重污染。

四、最佳工作条件

图4示出在不同的氮气压时,输出功率随放电电流的变化。曲线上的每一点,是在最佳镉源温度时测得的。

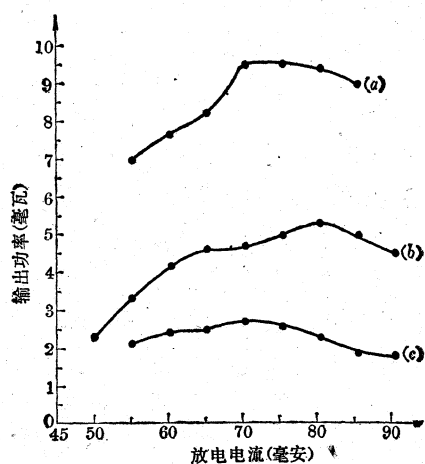


图4 对几个不同氮气压,在最佳镉源温度时,输出功率随电流的变化
曲线a—氮气压强=5.8托; 曲线b—氮气压强=4.0托; 曲线c—氮气压强=8.2托;

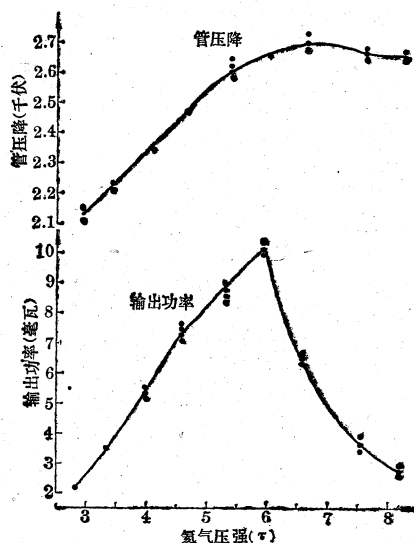


图5 在最佳镉源温度和放电电流的情况下,输出功率和管压降随氮气压而变化
(管号: 507, 最佳镉炉温度, 最佳放电电流)

由图可以看出,在固定氮气压的情况下,随着放电电流的增加,输出功率随之增加,直至达到最大值。电流再继续增加,功率则逐渐下降。说明电流存在着饱和值。

实验结果表明,最佳放电电流与毛细管管径成正比。它的范围一般由下式确定:

$$I \approx (40 \sim 50)d$$

其中 I 为放电电流,单位为毫安。 d 为毛细管直径,单位为毫米。

图5示出输出功率和管压降随氮气压的变化。在一个较大的氮气压范围内,激光仍可振荡。一般氮气压的最佳值与毛细管管径成反比,并服从下列关系:

$$p \cdot d \approx 10 \text{ 毫米} \cdot \text{托}$$

其中 p 为氮气压,单位为托。 d 为毛细管管径,单位为毫米。

图6示出在固定氮气压和放电电流的情况下,输出功率和管压降随镉源温度的变化。由图可以看出,随着镉源温度的增加,输出功率急剧上升,达到峰值以后又急剧下降。说明输出功

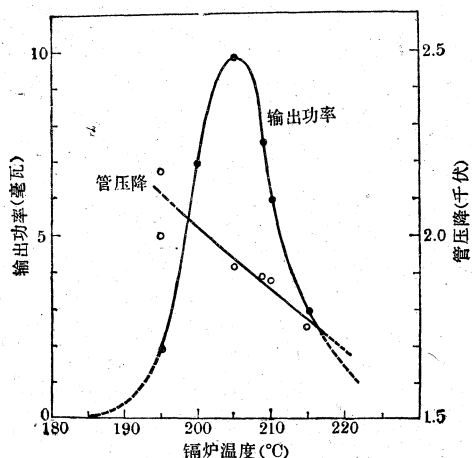


图6 在固定氦压和放电电流情况下, 输出功率和管压降随镉源温度而变化 (管号: 508)

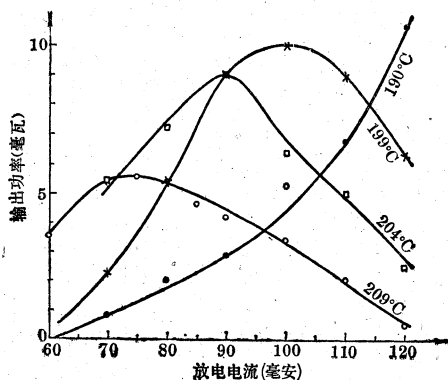


图7 对几个不同的镉源温度, 输出功率随放电电流的变化 (管号: 508)

率对镉源温度的依赖性极大。在最佳输出时, 镉源温度容许变化的范围很窄。这就要求我们能精确地控制镉源温度。一般要求能控制到 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。另外, 管压降的变化也可间接反映镉蒸气密度(对应于一定镉源温度)的变化。在纯氦放电时, 管压降较高, 当镉蒸气进入放电区后, 管压降便降低。实验表明, 激光管正常运转时的管压降, 比纯氦放电时要降低 $1/8 \sim 1/5$ 。

图7示出在固定氦压的情况下, 对几个不同的镉源温度, 输出功率随放电电流的变化。

图8示出在最佳激光输出时, 放电电流与镉源温度的关系。

激光管输出功率的波动取决于镉蒸气密度的起伏、放电电流的波动以及氦气压强的变化。在手动控制电流和控制温度的情况下, 输出功率随时间波动的情况示于图9。为了减少这种波动, 要求激光器的电源稳流。并且, 炉温控制装置必须有较高的控制精度, 以防止因镉源温度的变化而造成镉蒸气密度的起伏。为此, 我们研制了具有自动炉温控制的稳流电源, 效果较好。

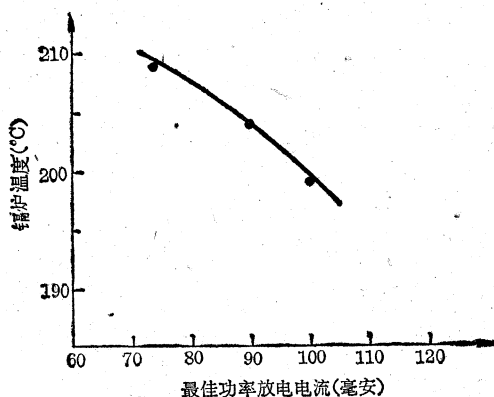


图8 在最佳激光输出时, 放电电流与镉源温度的关系 (管号: 507)

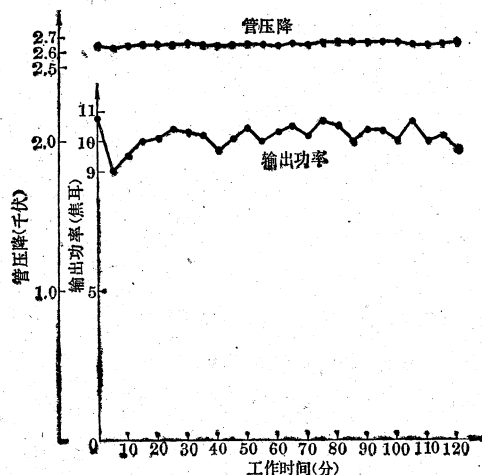


图9 激光输出功率随时间而波动的情况 (管号: 507, 压强5.82托, 放电电流: 70毫安)

下表给出几支激光管的结构和参数,其中输出功率的大小不仅取决于结构尺寸,还与每支管子的工艺质量有很大的关系。

激光管的工作参数

管子序号	毛细管长度 (毫米)	毛细管内径 (毫米)	He气压强 (托)	放电电流 (毫安)	镉源温度 (°C)	管压降 (伏)	输出功率 (毫瓦)	反射镜透过率	
								$R=\infty$	$R=1.6$ 米
7501	600	2.5	4.3	100	—	2090	10.8	2.8%	全反射
7507	600	1.7	5.8	70	—	2650	14.5	全反射	4%
7508	600	2.3	4.5	100	199	2050	11.0	全反射	4%
75011	800	3.2	3.1	130	210	1900	21.0	全反射	4%

He-Cd 激光器作为一种新的激光器,还正在进一步研究和改进之中,我们对它的研究还只是初步的,今后在功率和寿命方面还须进一步提高,在输出功率的稳定和降低辐射噪声方面也待进行探索。

参 考 资 料

- [1] W. T. Silfvast; *Scientific American*, 1973, **228**, No. 2, 89.
- [2] J. P. Goldsborogh; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, No. 6, 159~161.
- [3] J. R. Fendly, K. G. Herngvist *et al.*; *RCA Review*, 1969, **30**, No. 3, 422~428.
- [4] D. C. Brown, T. M. Swift; *IEEE, J. Quantum Electronics*, 1974, **QE-10**, No. 1, 94~95.

(上接 42 页)

(ii) 串电感构成仿真线路以改善波形时:我们知道,仿真线路的特征阻抗 $\sigma = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}}$, (对一节而言), 在实验上我们希望 $R_d = \sigma$, 因而 $\tau_{放} = 2n\sqrt{L_i C_i} = 2RC$, n 节仿真线路单元相对于灯可以有各种组合(如 n 并、 n 串、并串混合等等)可以作类似计算得到。

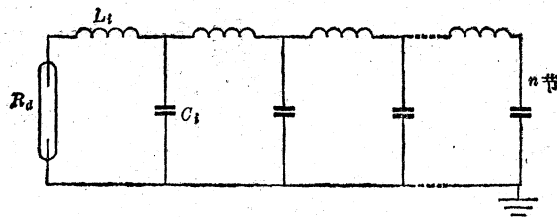


图 5

这样得到的 $\tau_{放}$ 首先是与实际放电时间不会准确一致(会由于各种实际原因影响)。另外就是要注意 $\tau_{放}$ 并不是激光脉宽本身,在一般实验条件下,激光时间总是短于氙灯放电时间的。只有在把能源的充电电压继续提高时可以达到激光脉宽与氙灯放电时间逼近相等的工作点(这时一定要注意在灯负载强度允许范围内进行),这时的激光脉宽也就不随着电压升高而变长了。

以上只介绍一下在通常条件下可以实用的比较简单的测试激光波形和脉宽的方法。

尚 石 颖