

蒸汽激光及其相似性关系的研究

上海海光玻璃制品厂 三结合研制组
上海市激光技术试验站

蒸汽激光是利用亚稳态氦原子 $\text{He}(2^3\text{S})$ 或氦离子 He^+ 为能量的载体, 通过潘宁效应或转荷效应将亚稳态氦原子的激发能或氦离子的电离能交给低电离电位元素的原子, 使其电离和激发。目前, 蒸汽激光已有氦-镉激光^[1]、氦-锌激光^[2]、氦-硒激光^[3]、氦-碘激光^[4]、氦-汞激光^[5]、氦-碲激光^[6]和氦-铜激光^[7]等共有一百余条连续工作的激光谱线, 波长在 3250 埃至 1.26 微米之间, 最大功率可达 200 毫瓦以上。这些元素的一次电离电位在 7 至 12 电子伏特之间, 二次电离电位在 16 至 22 电子伏特之间。而氦亚稳态 $\text{He}(2^3\text{S})$ 的激发能为 19.8 电子伏特, 氦离子的电离电位为 24.5 电子伏特。因此, 其能量正好使低电离电位元素的原子电离并激发到较高的离子激发态。由原子结构理论可知, 原子的较高的离子激发态下边一般存在与该能级有光学联系且寿命比较短的下能级。这些下能级不存在特殊的泵浦机构, 集居数应比该较高的激发态低, 这对能级之间便能形成集居数反转, 并能产生激光振荡。这样, 蒸汽激光的工作物质与工作波长就比较丰富了。有人曾在理论上分析^[8], 认为镁、铅、镓、银等元素可以产生 2000 埃至 4000 埃连续紫外激光振荡。这一光谱区连续工作的激光谱线较少, 新的强连续紫外激光谱线的发现将会推进激光光谱学、光化学、光生物学和激光在医学上的应用。除此以外, 蒸汽激光在可见、近红外、近紫外的可供选择的探索物质还有锆、钡、钙、硫、铈、铈、钋、锰、铯、铷、铟、金、铋等元素。无疑蒸气激光的工作物质与工作谱线将会大大地扩大。氦-镉激光是在 1968 年由脉冲放电激光资料发现的, 其他蒸汽激光大多是七十年代的产物, 大多也是从脉冲放电激光资料发现的。少数的蒸汽激光是在空心阴极实验中发现的, 如用铜空心阴极做氦-氩空心阴极激光探索中, 发现了近红外铜离子激光, 铜蒸汽由放电时空心阴极溅射产生。

由转荷效应引起的激光谱线一般在空心阴极中产生^[9], 但也有一些例外, 如氦-碘激光。空心阴极放电区是阴极位降区, E/P 较大, 存在较多快速电子电离氦或氦离子。而潘宁效应引起的激光谱线在空心阴极与轴向放电均能产生。蒸汽激光是气体激光的重要发展, 大大充实了可见、近红外和近紫外连续激光谱线, 在激光光谱学、医疗、全息照相、显示、制板、传真、教学、光化学、测污和农业等方面已显示出广泛的用途。

本文总结了由实验得到的氦-镉激光、氦-锌激光和氦-硒激光的特性, 并进一步总结出这三种激光一系列相似性关系的经验公式, 如最佳放电电流、激光输出功率、管压降、激光器效率以及增益与几何参量关系等。

这些经验公式可供这类激光器设计的参考, 以利于普及和推广。

一、氦-镉激光

为了克服氦-镉激光器的噪音,在研制中设计了几种由放电等离子体加热的低噪音氦-镉激光器。其中,独创的低噪音边块式结构(图6),经过一个时期的使用考验表明,与国外的镉环结构相比,它有很多优点。毛细管勿需切断,各段彼此无遮拦现象,通光率强,在放电管尺寸相同的情况下获得的激光功率大 $\frac{1}{2}$ 以上。镉蒸汽浓度均匀,功率稳定性和重复性好。放电加热熔融后,毛细管管壁与外套玻璃全部空隙不会完全堵住,噪音低。

蒸汽激光器放电时,蒸汽离子每小时从阳极迁移至阴极的质量,经我们简单推导得到

$$M = \frac{900\pi D^2 AN^+ \mu^+ V_{\text{有效}}}{N_0 LP_{\text{He}}} \quad (1)$$

式中: D ——管径;

A ——克原子量;

N_0 ——阿佛加德罗常数 (6.023×10^{23} 个/厘米³);

L ——放电毛细管长度;

$V_{\text{有效}}$ ——有效电压降;

μ^+ ——蒸汽离子迁移率;

N^+ ——蒸汽离子浓度;

对镉来说, $A=112.4$ 克; $N^+ \approx 8 \times 10^{11}$ 厘米³; $\mu=1.08 \times 10^4$ 厘米²/伏·秒; $L=50$ 厘米; $D=0.2$ 厘米; $V_{\text{有效}}=1000$ 伏; $P_{\text{He}}=4$ 托,则每小时迁移至阴极的镉为 0.7 毫克。

在长 70 厘米,内径 2.7 毫米的放电管中获得 4416 埃稳定功率输出 37 毫瓦。采用曲率半径为 1.73 米的凹面全反射镜(反射率为 99.7%)和平面耦合反射镜(反射率为 95%)。反射镜用电子枪蒸镀以氧化锆和氧化硅,全反射镜为 23 层,耦合反射镜为 15 层。

图 1 给出激光功率与放电电流关系曲线,最佳放电电流为 90 毫安。图 2 给出激光功率与加热炉温度之间的关系,外加热结构制作方便,并可供测量激光功率与加热炉温度参量关系。由于加热炉温度与管内镉的温度在升温 and 降温时是不同的,故升温曲线和降温曲线不完全重合。

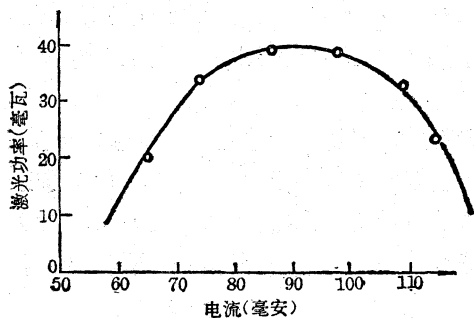


图 1 激光功率与放电电流

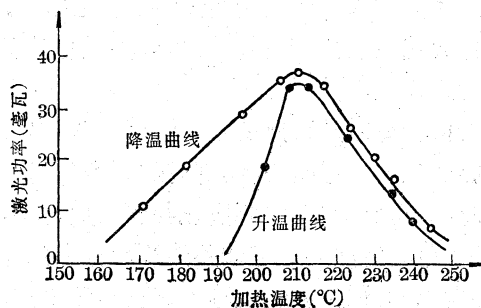


图 2 激光功率与加热炉温度

另外,在内径为 3.2 毫米,长为 97 厘米的放电管中获得 4416 埃、58 毫瓦激光输出。最佳放电电流在 90 至 105 毫安之间,最佳气压为 3.3 托,相应的 $P \cdot D$ 值为 1.14 托·厘米。最佳管壁炉温为 214°C,其特性曲线与图 1、图 2 结果十分相似。

二、氦-锌激光

锌镉汞是同属三种元素，蒸汽压比较高，加热温度较低，元素比较稳定，其较高的离子激发态的总激发能量在 20 至 24.5 电子伏特之间。这些元素的基态分别是 $3d^{10}4s^2$ 、 $4d^{10}5s^2$ 和 $5d^{10}6s^2$ ，壳层结构相似。由于 He(2^3S) 的激发能固定，He(2^3S) 通过潘宁效应激发锌镉汞三种激光的上能级不存在对应关系，激光谱线的下能级一般也不存在对应关系。

轴向放电结构的氦-锌激光有二条谱线：一条是近红外 7479 埃 ($3d^95s^2D_{5/2} \sim 3d^{10}4p^2P_{3/2}$) 和一条黄激光 5894 埃 ($3d^95s^2D_{3/2} \sim 3d^{10}4p^2P_{1/2}$)，其能级图如图 3 所示。近红外激光可作红外照相光源，用于侦察等特殊用途。该线对皮肤有良好的穿透作用，可用于医疗。黄激光与钠光灯谱线很相近，钠光灯谱线是 5890 埃与 5896 埃，单色性、强度和方向性都比钠光灯谱线好。

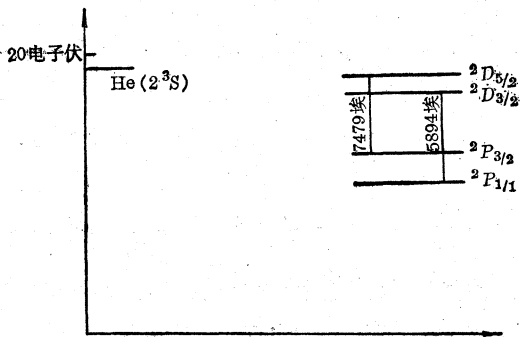


图 3 氦-锌激光能级图

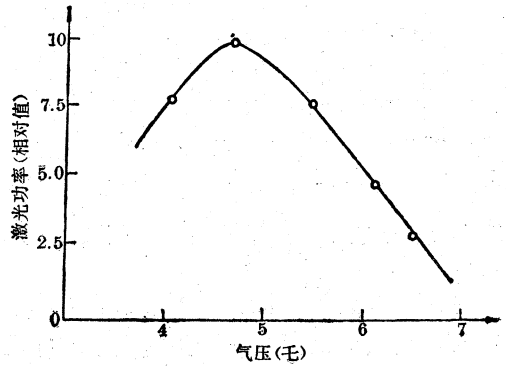


图 4 氦-锌激光功率与氦气压的关系

图 4 给出 7479 埃氦-锌激光功率与气体气压之间的关系曲线。放电毛细管长度 45 厘米，管径 2.1 毫米，最佳加热温度 305°C 。图 4 得出最佳气压为 4.4 兆左右。

图 5 是氦-锌激光功率与放电电流之间的关系曲线，表明 7479 埃与 5894 埃最佳电流相同，均为 70 毫安左右。

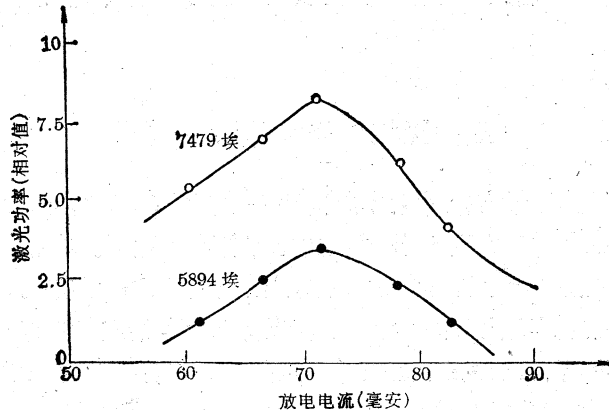


图 5 氦-锌激光功率与放电电流的关系

三、氦-硒激光

氦-镉激光器与氦-锌激光器中能量主要由氦亚稳态通过潘宁效应转移给镉原子或锌原子。氦-硒激光器中还应考虑氦离子与硒分子 Se_2 、 Se_4 和 Se_6 的碰撞过程。硒激光蒸汽压较高,不必象氦-镉激光和氦-锌激光那样做成环形或边块形结构(图 6 下),氦-硒激光仅需将硒放在阳极附近(图 6 上),放电的热量足以将硒加热到产生所需要的蒸汽压 10^{-2} 至 10^{-1} 托,其温度约为 200°C 左右。故氦-硒激光不需外加热炉。氦-硒激光存在一个问题是硒对玻璃有严重的腐蚀作用,使玻璃变质。

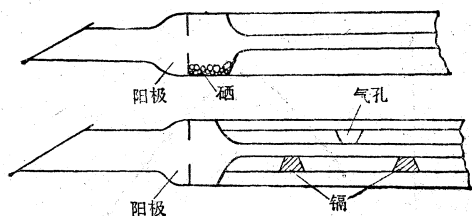


图 6 放电加热的氦-硒激光与边块结构的氦-镉激光

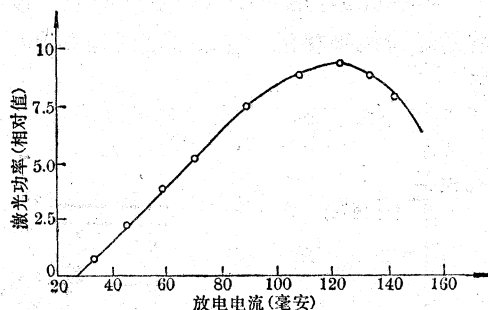


图 7 氦-硒蓝绿激光功率与放电电流的关系

氦-硒激光谱线很多,可见激光 24 条,近红外激光 22 条,主要激光谱线在蓝绿光波段。氦-硒激光谱线之间存在严重的竞争。实验发现,若腔内不存在色散元件,用各种波段的宽带介质膜片,优先振荡的总是 5228 埃和 4976 埃等蓝绿光谱线。优先振荡的蓝绿光谱线还有 4993 埃、5176 埃、5068 埃和 5305 埃。图 7 给出蓝绿光谱线功率与放电电流之间的关系曲线。放电毛细管直径为 2 毫米,最佳放电电流为 110 毫安左右。

实验还发现,氦-硒激光不存在严格的最佳气压,氦气大于 15 托时激光功率不随氦气气压变化。氦-硒激光放电使硒从阳极迁移到阴极的电泳搬运能力很强,远比氦-镉激光和氦-锌激光迅速,这是由于氦-硒激光中硒的蒸汽压较高,以及由于分子离子态的存在。为了保证窗口不被粘污,阴极一边加一个辅助阳极是十分必要的。耀眼的蓝绿氦-硒激光可用于显示、存储、全息照相等领域。

四、蒸汽激光的相似性关系

由于气体的放电器件特性与尺寸大小之间存在相似性定律^[10],当尺寸变化时,放电管内气压也随着变化,保持 $P_{\text{He}}D$ 值不变,则这些放电器件特性相似。在相似的放电管内,放电等离子体电子温度、 E/P_{He} 等参量为一常数。所以,当激光管的尺寸变化时,管径 D 与最佳气压 P_{He} 的乘积一般是不变的。其他一些参量,如管压降、最大输出功率、最佳放电电流、激光效率与激光增益等与管径和管长也存在一定关系。这些参量与管径及管长的关系可以用一系列经验公式表达出来,这些经验公式对设计这些激光器件是十分有用的。表 1 列出氦-镉激光的一些实验参量,表明 P/LD 与 I/D 近似为常数。

表 1 氦-镉激光器的参量

管径 (毫米)	管长 (厘米)	最佳电流 (毫安)	I/D (毫安/厘米)	输出功率 (毫瓦)	P/LD (毫瓦/厘米 ²)
1.8	42	55	306	13	1.9
2.3	50	66	287	20	1.8
2.7	70	90	330	37	1.95
3.2	97	95	297	58	1.91

从表 1 可得氦-镉激光最佳放电电流与最大输出功率的经验公式:

$$I_{最佳} = \alpha D \quad (2)$$

$$P_{最大} = \beta LD \quad (3)$$

式中 α 和 β 是常数, L 为管长, D 为管径, 均以厘米为单位, 这两个公式对氦-锌激光和氦-氟激光器也成立。另外, 从实验中也得到了毛细管两端的管压降和最佳气压的两个经验公式, 也适用于其他蒸汽激光。

$$V = \gamma \frac{L}{D} \quad (4)$$

$$P_{He} D = \delta \quad (5)$$

式中 γ 和 δ 也是常数, P_{He} 为氦气的气压, 以托为单位, V 为毛细管两端的电压降, 但实验中测定的是整个管压降, 经验公式(4)仍然很好地符合。

根据激光效率的定义, 利用以上经验公式得到

$$\eta = \frac{P_m}{IV} = \eta_0 D \quad (6a)$$

式中

$$\eta_0 = \frac{\beta}{\alpha \gamma} \quad (6b)$$

从实验得到氦-镉、氦-锌和氦-硒激光各相似性关系公式(2)至(6)中的常数 α 、 β 、 γ 、 δ 和 η_0 , 列于表 2。

表 2 蒸汽激光相似性关系常数

激光器	α (毫安/厘米)	β (毫瓦/厘米 ²)	γ (伏)	δ (托·厘米)	η_0 (厘米 ⁻¹)
氦-镉	300	对 4416 埃 1.9	8.3	低噪音 0.75 非低噪音 1.2	7.6×10^{-4}
氦-锌	330	对 7479 埃 1.0	8.8	0.95	3.4×10^{-4}
氦-硒	600	对蓝绿光 2.2	8.0	3.0	4.6×10^{-4}
氦-氟	100	0.8	9.7	0.3	8.2×10^{-4}

表 2 中最后一行不是蒸汽激光, 氦-氟激光是作为比较列入的, 另外, 对氦-硒激光相似性关系(2)和(5)近似地成立。严格地说, 最佳电流 $I_{最佳} = \alpha' I^g$, α' 为常数, g 是大于 1、小于 2 的

系数。

还有一个相似性关系是激光增益系数与几何参量之间的关系,增益系数较难准确地测量。实验中发现未饱和多普勒线宽中心增益大致有如下关系:

$$G_m = \varepsilon \frac{L}{D} \quad (7)$$

式中 ε 为一常数。而未饱和多普勒线宽中心增益的理论表达式为

$$G_m = \frac{2}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1\right) L}{\tau_{\text{自发}}} \frac{\lambda_2}{8\pi} \quad (8)$$

式中 $\tau_{\text{自发}}$ 为激光波长 λ 的自发辐射系数;

g_2 和 g_1 分别为上下两能级的权重;

n_2 和 n_1 为上下激光能级的集居的浓度;

$\Delta\nu_D$ 为多普勒半宽度:

$$\Delta\nu_D = \sqrt{\frac{8kT}{M} \ln 2} \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

式中: M ——蒸汽原子克原子量;

k ——玻耳兹曼系数;

T ——工作物质的温度。

对氦-镉激光,多普勒半宽度约为 850 兆周。

由(8)式及(7)式可知, $n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \approx n_2 \propto \frac{1}{D}$ 。表明了激光上能级集居数浓度反比于管径。

参 考 资 料

- [1] Silfvast W. T. et al.; *Appl. Phys. Lett.*, **19** (1971), 445.
- [2] Piper J. A. et al.; *Jour. Phys. D. Appl. Phys.*, **8** (1975), 127.
- [3] McKenzie A. L.; *Jour. Phys. B. Appl. mol. Phys.*, **7** (1974), L141.
- [4] Hettori et al.; *IEEE Jour. Quant. Elec.*, **10** (1974), 739.
- [5] Piper J. A. et al.; *Opt. Comm.*, **13** (1975), 122.
- [6] Watanabe S. et al.; *Japan Jour. Appl. Phys.*, **11** (1972), 600.
- [7] Csillag C. et al.; *Phys. Lett.*, **50A** (1974), 13.
- [8] Collins G. J.; *Jour. Appl. Phys.*, **44** (1974), 4633.
- [9] Fukuda S. et al.; *Japan Jour. Appl. Phys.*, **13** (1974), 667.
- [10] Engel V.; «Ionized Gases», 1950, London.

(上接第 44 页)

样就得到了对特定能态分子高度敏感的鉴定器。这种鉴定器对分子束技术和波谱学来说,都将有很大价值。

激光技术正在飞速发展,在各学科领域中的应用也是日新月异。上面列举的问题,只是涉及分析化学的某些侧面。然而,即使从这些不完整的材料也不难体察到激光技术对于分析化学正在产生和可能产生的巨大影响和推动。用激光所从事的一些工作绝不是常规手段的改进提高,而是常规手段所不能代替的。随着激光应用的日益普及和深入,随着激光技术本身的进一步完善,使用激光的分析手段必然要刷新常规手段提供的数据,因而也必将进一步改变分析化学的面貌。