

连续工作的氩离子激光器

邱元武 章思俊 张道中 张绮香

(中国科学院北京物理研究所)

提 要

本文描述一台用直流放电激发的、分段石墨孔的氩离子激光器，最大输出功率 8.3 瓦，效率 5.1×10^{-4} 。

氩离子激光器^[1,2]的增益很高，输出功率较大，是目前最有应用价值的可见和紫外相干光源之一。氩离子激光器的激发方式很多，本文描述一台用直流放电激发的氩离子激光器。

一、激发机理

图 1 是有关的氩离子的能级图，粒子数反转是在氩离子 4p 和 4s 的能级之间形成的，最重要的激光跃迁是 $4p^2D_{5/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ 和 $4p^4D_{5/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ ，波长分别是 4800 Å 和 5145 Å。

氩原子的一次电离能是 15.75 电子伏特。氩原子与电子碰撞获得能量离化而处于氩离子的基态 $3p^5$ ，再与电子碰撞而激发到 4p 能态，这个过程共有三种可能的途径：(1) 从 3p 经电子碰撞后直接到达 4p (因为在直流放电激发的情形中，电子温度比激发能量阈值低，所以激发是在阈值附近而不满足波恩近似条件，因此不受偶极矩选择定则要求宇称不同的限制)。(2) 从 3p 经电子碰撞后到达比 4p 低的亚稳态——主要是量子数 $J=7/2$ 和 $9/2$ 的 3d，再从 3d 经电子碰撞后到达 4p。(3) 从 3p 经电子碰撞后到达比 4p 高的 ns ($n>4$) 和 nd ($n>3$)，再经辐射跃迁到达 4p。在等离子体电荷中性和电子温度与放电电流无关的近似下，由上述的三种途径到达 4p 能态的粒子数 N_2 的变化都是

$$N_2 \propto n_e n_i \propto n_e^2 \propto J^2$$

其中 n_e 、 n_i 和 J 分别是电子密度、离子密度和

放电电流密度，这种与放电电流平方成正比的关系是与自发辐射测量的实验结果一致的。受激的氩离子主要是靠辐射跃迁到比 4p 低的能级而离开 4p 能态。然而由于电子碰撞而离开 4p

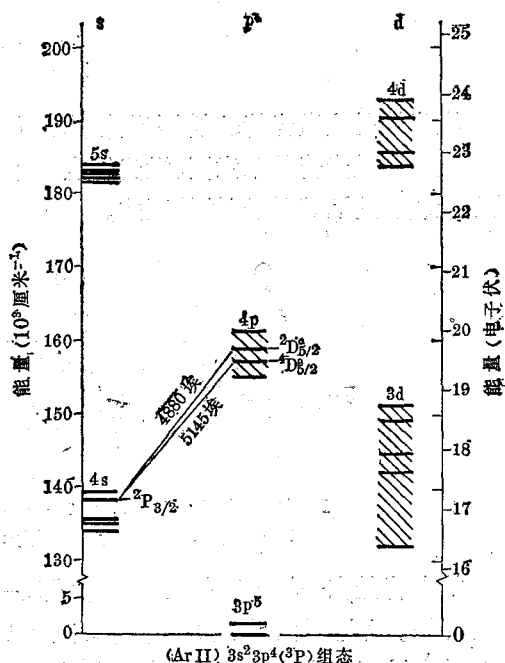


图 1 有关的氩离子的能级图

的情形,在电子密度 $n_e < 10^{14}$ 厘米⁻³ 时是小到可以忽略的。

处于基态 $3p^5$ 的氙离子也可以再经电子碰撞而激发到 $4s$, 或者到比 $4s$ 高的 $np (n > 3)$ 后又经辐射跃迁到 $4s$, 所以氙离子被激发到 $4s$ 的速率常比被激发到 $4p$ 的速率大,但是在电子密度 $n_e > 10^{14}$ 厘米⁻³ 而辐射陷获没有发生时,在 $4s$ 的氙离子由于辐射跃迁(辐射 $\lambda \approx 740 \text{ \AA}$ 的真空紫外光)而回到基态的速率,比 $4p$ 的氙离子离开 $4p$ 的速率快得多,所以就可能在 $4p$ 和 $4s$ 之间形成粒子数反转。具体地说,在下表中列出了 $4p^2D_{5/2}^0$ 、 $4p^4D_{5/2}^0$ 和 $4s^2P_{3/2}$ 能级寿命的计算值和在内径是 2 毫米的放电管中,充气气压是 0.3 毫米汞柱和放电电流是 5 安培的情形下布居的实验值。从自发辐射的测量说明,一切从激光下能级 $4s^2P_{3/2}$ 出发的自发跃迁谱线的总强度,与一切从激光上能级 $4p^2D_{5/2}^0$ 或 $4p^4D_{5/2}^0$ 出发的自发跃迁谱线的总强度有相同的数量级,这就是说氙离子受激到 $4p^2D_{5/2}^0$ 或 $4p^4D_{5/2}^0$ 能级的速率有相同的数量级,但是因为 $4s^2P_{3/2}$ 能级的寿命比 $4p^2D_{5/2}^0$ 或 $4p^4D_{5/2}^0$ 能级的寿命短一个数量级,所以布居也小一个数量级(见表),也就是说在 $4p^2D_{5/2}^0$ 或 $4p^4D_{5/2}^0$ 和 $4s^2P_{3/2}$ 能级之间形成粒子数反转。

$4p^2D_{5/2}^0$ 、 $4p^4D_{5/2}^0$ 和 $4s^2P_{3/2}$ 能级寿命的计算值和布居的实验值^[3]

| | $4p^2D_{5/2}^0$ | $4p^4D_{5/2}^0$ | $4s^2P_{3/2}$ |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| 寿命 (10 ⁻⁹ 秒) | 8.72 | 5.96 | 0.39 |
| 布居 (10 ⁹ 厘米 ⁻³) | 4.78 | 4.98 | 0.42 |

二、结构和工艺

激光器是由激光管、磁场和谐振腔组成的。

图 2 是激光管的示意图。激光管全部用石英制成,采取放电管、水冷套和储气套里外三层,及阳极、放电孔和阴极同轴的类型。

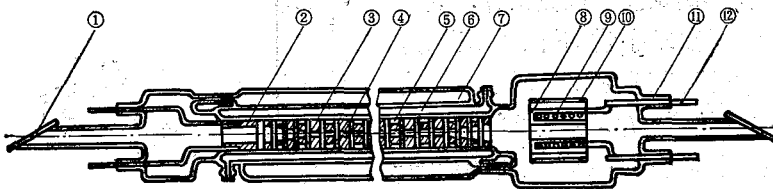


图 2 激光管的构造

- 1—布儒斯特窗; 2—阳极; 3—石墨圆盘; 4—放电孔; 5—回气孔; 6—水冷套;
7—储气瓶, 8—阴极; 9—热子; 10—热屏; 11—过渡接头; 12—电极

放电管是在一根很直的石英管中放入一组石墨圆盘做成的, 石墨盘之间用厚 2 毫米的石英环绝缘。石墨盘用高纯石墨做成, 直径 35 毫米, 厚 8 毫米, 中心有一个直径 3.5 毫米的孔作为放电孔, 四周有四个(6×7)毫米²的槽作为回气孔, 以平衡管内的气压。石墨盘先经过烧氢、清洗和烘干后再装入石英管内, 在组装时要使所有石墨盘的中心孔同轴, 而使回气孔相互错开, 以防止在回气孔中放电。在放电管两端的石墨盘厚 5 毫米, 中心孔的直径逐渐增大形成过渡段, 以降低电位梯度, 防止离子对石墨的侵蚀。放电管中心孔均匀部分总的长度是 850 毫

米,两端过渡段的长度各为 40 毫米。水冷套在放电管外层,而储气套又在水冷套外层。

阳极用直径 35 毫米、高 50 毫米的石墨圆柱做成,中心有直径 12 毫米的孔,电极是用钨丝把直径 3 毫米的钨杆直接绑在阳极上,通过过渡接头引出管外。阴极是在用海绵镍做成的双层同轴圆筒的两壁涂上氧化物做成的,在圆筒的夹层内放入用钨丝绕成的垫子,垫子电压 9 伏,垫子电流 16 安培,阴极的工作温度约 800°C 左右。垫子、阴极和垫屏都点焊在钨杆上,通过过渡接头引出管外。

布儒斯特窗是用光胶封的,窗片用优质熔石英玻璃做成,直径 25 毫米,厚 3 毫米,窗片的表面误差 $N=0.5$, $\Delta N=0.1$,不平行误差 $\theta=5$ 秒,光洁度 P_1 。布儒斯特角是用氩-氟激光器输出的激光光束对准放电孔后用角规量的。

激光管做成后接上排气台进行石墨的高频去气和阴极的分解、激活,使激光管内的真空度达 1×10^{-5} 毫米汞柱以上,最后充入氩气用大电流放电进行老化。电源是用大容量电解电容器滤波的 380 伏三相半控桥式整流电路,可输出直流电流 50 安培,限流电阻是用水冷却的。触发是用 4 千伏直流高压。

磁场是在螺旋管线圈中通以直流电流获得的,产生的磁场强度是 75 高斯/安培。线圈套在激光管外面,其中心轴与激光管放电孔的轴一致。

激光器的腔长是 2 米,由两块曲率半径 2 米的凹面反射镜构成共焦腔,反射镜镀以多层介质膜,带宽是 $4500 \sim 5200 \text{ \AA}$ 。反射镜的基片是用光学玻璃做成的,直径 35 毫米,厚 4 毫米,表面误差 $N=1$, $\Delta N=0.5$,中心偏差 $C=0.01$,光洁度 P_{II} 。

三、工作参量

在实验中,测量气压是用 U 形管油压计,测量功率是用“鼠巢”功率计,它是用干电池定标的。

图 3 是在一定的放电电流、磁场和输出耦合下,输出功率与气压的关系,其中磁场的强度和输出耦合的透射率为初步测量得到的最佳值。图 3 说明输出功率对于气压的关系变化比较尖锐,而最佳气压又与放电电流有关,放电电流越大,最佳气压越高。这是因为随着放电电流的增加,氩原子被放电电离成多次离子,或被放电驱出放电孔均匀部分,使放电孔均匀部分的氩原子密度减小,所以需要更高的工作气压。

图 4 是在一定的放电电流、电压和输出耦合下,输出功率与磁场的关系,其中气压取图 3 中的最佳值。图 4 说明输出功率对于磁场的关系变化比较缓慢,最佳磁场是 600 高斯左右。

图 5 是在一定的放电电流、电压和磁场下,输出功率与输出耦合的关系,其中气压和磁场强度分别取图 3 和图 4 中的最佳值。图 5 给出放电电

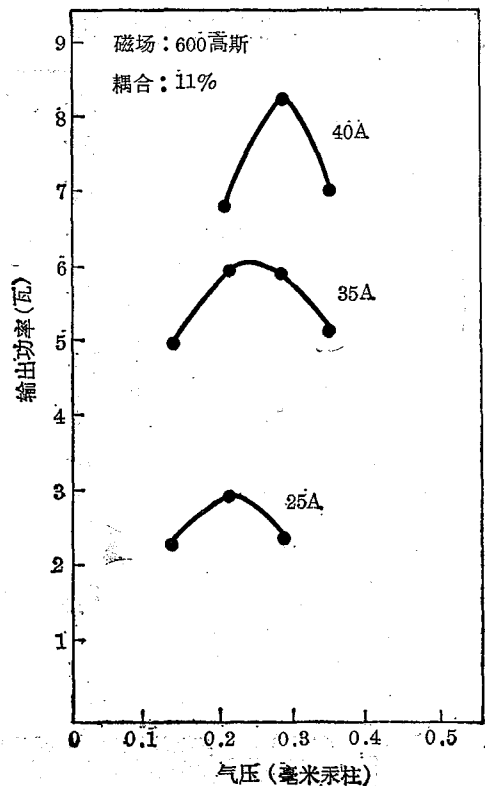


图 3 输出功率与气压的关系

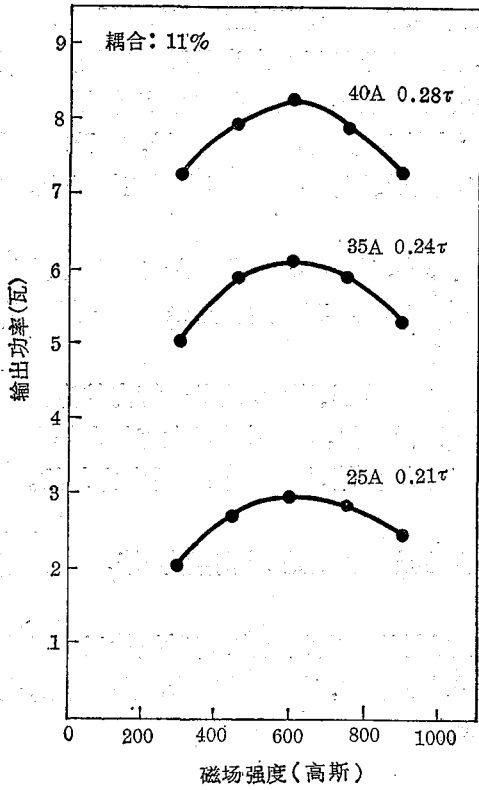


图4 输出功率与磁场的关系

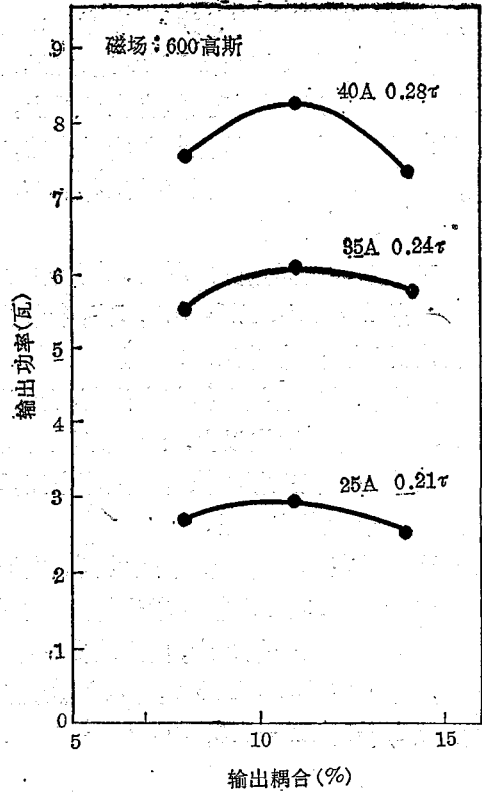


图5 输出功率与输出耦合的关系

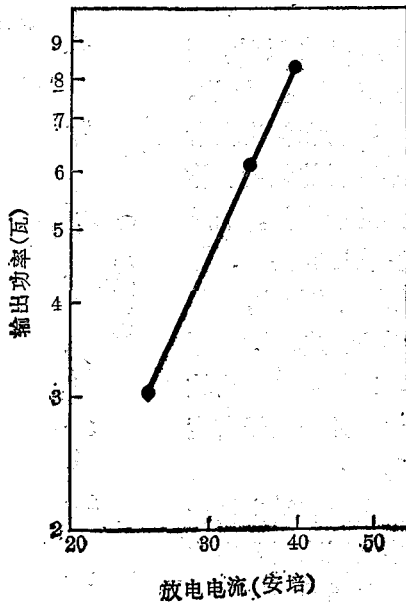


图6 输出功率与放电电流的关系



图7 激光输出的光谱成份

封离型 CO₂ 激光器

北京电子学研究所 501 组

CO₂ 激光器是气体激光器中功率较大、效率较高的一种器件。激光波长在 10.6 微米附近 (相应于 CO₂ 00°1—10°0 跃迁)。自从 1964 年国际上出现这类器件以来,已有多钟的型式。连续波功率从几百毫瓦至几十千瓦,脉冲能量从几毫焦耳到几千焦耳,可以满足各种不同的应用要求。

早期的 CO₂ 激光器都是流动型的,即气体从放电管的一端流入,在放电过程中发生各种物理的和化学的变化后,从另一端用真空泵排出。这种类型的激光器仍然保留至今。例如,目前美国广泛使用于工业加工和科学研究的 50 瓦和 250 瓦产品就是这种类型。流动型激光器具有制造工艺简单、容易维护的优点,并且几乎不存在寿命问题。但是由于需要附加的气瓶和真空泵,使整个系统复杂化,气体的流动、真空泵的振动使输出功率和频率不稳定。稍后发展的封离型器件没有这些缺点,适合于中小功率工业加工和进行有关光通讯、光雷达等的基本研究,但在最初的发展阶段,功率和效率都比流动型差得远,寿命仅有几十小时,甚至更短。因此,研制高效率长寿命的封离型器件就是一项重要的课题。

一、激光器的设计

1. 管型

图 1 至图 3 是典型的封离型器件。在图 1 的器件中,腔镜片——球面镀金全反射镜和平
面输出窗镜是直接密封在放电管上的,所以称为内腔式激光器。又因为腔镜片是事先对准好
不必再调节的,所以又称为“固定内腔式”。图 2 的器件也是固定内腔式。但在腔内放置了一个布儒斯特偏振片,所以激光器输出光束的偏振方向是严格固定的。图 3 的器件中有一个腔

(上接第 20 页)

流是 40 安培时的最大输出功率是 8.3 瓦,测得相应的管压降是 410 伏,所以效率是 5.1×10^{-4} 。

图 6 是在最佳工作条件下,输出功率与放电电流的关系。测得的阈值电流是 5 安培,所以图 6 说明,相对于阈值电流,输出功率开始以大于 $P \propto I^2 - I_{\text{阈}}^2$ 的比例关系增加^[4],其中 P 是输出功率, I 是放电电流。

图 7 是放电电流为 20 安培时,用三棱镜摄谱仪摄得的激光输出的光谱成份。

参 考 资 料

- [1] W. B. Bridges A. N. Chester, A. S. Halsted, I. U. Parker, *Proc. IEEE*, **59**(5), 724 (1971).
- [2] В. Ф. Китаева, А. П. Одинцов, Н. Н. Соболев, *Успехи физических наук*, **99** (3), 361 (1969).
- [3] R. I. Rudko, C. L. Tang, *J. Appl. Phys.* **38** (12), 4731 (1967); **39** (8), 4046 (1968).
- [4] G. Herziger, W. Seelig, *Z. Physik*, **219** (1), 5 (1969).