

# 高重复频率脉冲 $\text{Ar}^+$ 激光器及 在高速风洞中的应用

束继祖 刘 方

(中国科学院力学研究所八室)

激光的高亮度和良好的相干性, 给在高速风洞实验中显示流场用的光学仪器(阴影仪、纹影仪和干涉仪)提供了良好的光源。采用激光作为光源不仅提高了测量灵敏度, 而且简化了仪器的结构和调整工作。

$\text{Ar}^+$  激光器的输出波长, 基本上是散布在  $5000\text{\AA}$  左右的几条蓝绿光谱线, 其中以  $4880\text{\AA}$  和  $5145\text{\AA}$  强度最大; 在脉冲工作时  $4765\text{\AA}$  的增益最高。这个光谱范围对风洞流场显示(特别是对激波管风洞、烧蚀风洞)较为适合, 便于避开实验中产生的杂光干扰。

在高速风洞实验中, 气流的速度很高, 一般是音速的数倍(即  $M$  数), 甚至十多倍。为了获得清晰的流场显示照片, 其曝光时间应控制在微秒的量级内。要了解动态变化过程, 需要用一定的频率摄取一系列的照片。采用具有一定频率的激光脉冲组配合纹影显示是个有效的方法。它可以代替价格昂贵、设备庞大的等待型高速摄影机。

激光脉冲组的持续时间应该等于或大于所研究对象的变化周期。对于激波管风洞来说, 一次启动过程一般在 10 毫秒到 20 毫秒。这样长的脉冲工作持续时间, 采用  $\text{Ar}^+$  激光器是很容易得到保证的。

$\text{Ar}^+$  激光在脉冲电流驱动下的性能:

图 1 为  $\text{Ar}^+$  激光的能级图<sup>[1]</sup>, 图中  $3P^6\ ^1S_0$  为  $\text{Ar}$  中性原子基态,  $3S^23P^5$  为  $\text{Ar}^+$  的电子基态, 它是由电子碰撞从中性原子基态  $3P^6\ ^1S_0$  激励上去的。 $3P^44S$  为电子激发态组系, 它是激光跃迁的下能级组;  $\text{Ar}^+$  的电子激发态组系  $3P^44P$  为激光跃迁的上能级组。激光跃迁是对应于  $3P^44P \rightarrow 3P^44S$  所属的各光谱项之间的跃迁。几条主要的光谱线相应的能级关系已在图 1 中标出。 $4^4P4d$  为更高的电子激发态组。

$\text{Ar}^+$  激光的激励机理, 已从不同的角度提了出来, 目前一般地认为有下列三种型式。第一种是由 Bennet<sup>[2]</sup> 提出的“一步”激励过程, 即处在基态的中性原子被电子碰撞直接激励到激光上能级 ( $3P^44P$ ) 的一次完成过程。为了实现这种激励, 达到粒子数反转的目的, 需要足够高的电子温度, 需要非常高的  $E/P$  [伏/厘米·毫] 值, 即采用高脉冲电压, 在较低的气体压力中进行放电的方式。

第二种类型是 Labuda<sup>[3]</sup> 提出的。布居在  $3P^44P$  上激光能级的粒子是由电子与处于基态离子 ( $3S^23P^5$ ) 或处于亚稳态的离子相碰撞所激励的; 而处于基态的离子则先由电子与基态的原子相碰撞所产生。这就是所谓的“二步”激励过程。

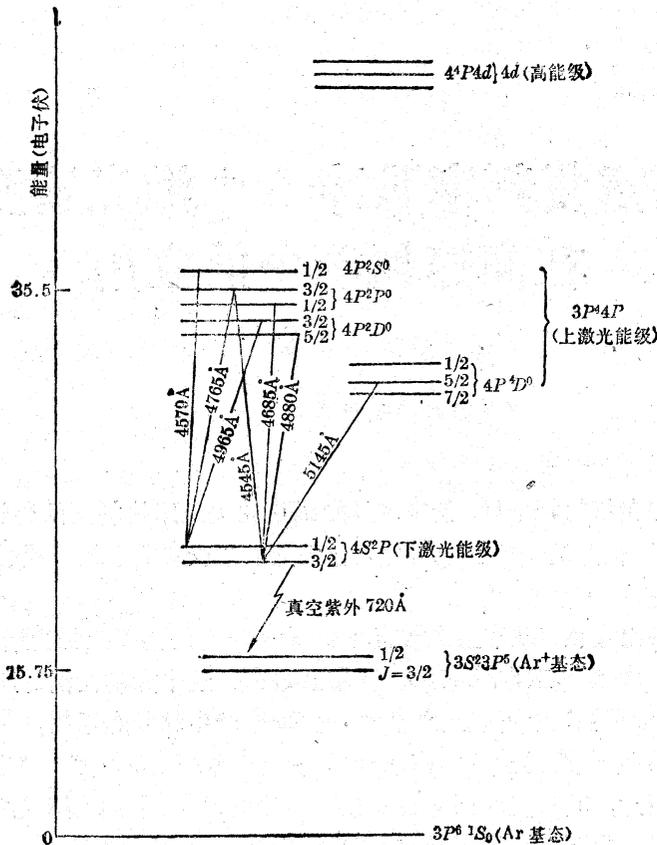


图1 Ar<sup>+</sup>激光能级跃迁图

然而激光上能级的粒子数居集，除了这两种激励的作用外，还存在着从 Ar<sup>+</sup> 更高的激发态能级(如 Ar<sup>+</sup> 的 4d 能级组)上，通过自发辐射而居集到这个能级上来，从而使激光上能级的粒子居集数增加，这就是所谓的“串级跃迁”<sup>[4]</sup>。Rudko 和 Tang<sup>[4]</sup> 在内径为 1 毫米的放电管中，在不加外磁场的情况下，测得由于这种“串级跃迁”使激光上能级 (<sup>3</sup>P)4P<sup>2</sup>D<sub>5/2</sub><sup>o</sup>(4880Å) 的粒子居集数占总数的 50%；Bridges<sup>[5]</sup> 在内径为 3 毫米的放电管中作了同样的实验，测得在 (<sup>3</sup>P)4P<sup>2</sup>D<sub>5/2</sub><sup>o</sup>(4880Å) 能级上的粒子数由于“串级跃迁”所居集的占 23%；在 (<sup>3</sup>P)4P<sup>4</sup>D<sub>5/2</sub><sup>o</sup>(5145Å) 能级上占 22%。并得出由于“串级跃迁”所居集的粒子数与放电电流的二次方成正比。因此它与二步电子碰撞过程是同时存在的。

Ar<sup>+</sup> 激光器工作在脉冲状态时，实现粒子数反转的激励方式到底是属于哪一种类型，或是哪一种占有优势，决定于放电电流、脉冲的持续时间，以及充气的压力。在一次脉冲驱动放电的过程中，往往这三种类型的激励效果都会表现出来。

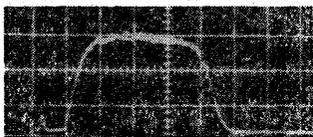


图2 低气压 Ar<sup>+</sup> 激光器在脉冲电流驱动时输出的光脉冲波型  
(扫描速度 10 微秒/格)  
(驱动电流脉冲宽度 60 微秒)

下面列举两个实验结果。图 2 为低充气压(小于 50 毫米)的器件，在 60 微秒宽度的矩形脉冲电流驱动下激光脉冲的输出波型。这里可以看到出现了两个激光脉冲；前面一个无论是在强度或宽度上来讲都较小，后一个则较强。分析如下：

在脉冲电流驱动的开始过程中，如果平均电子能量足够高(大于 35.5 电子伏特)，才能实现上激光能级的粒子数居集的目的。

的。这个过程主要是由电子碰撞直接激励上去的；它的上升速率与  $E/P$  [伏/厘米·托] 值成正比，这种效果在低气压下显得特别明显。这时将会出现第一个激光脉冲。

随后，就出现了两个妨碍这种“一步”激励过程的因素：即中性原子的密度不断地被电离而下降，使离子密度增加；离子的弹性碰撞使平均电子能量下降，使“一步”激励的几率下降，结果使居集数下降。这时离子基态或亚稳态的密度相应增高，而变得有利于“二步”激励过程。若这时由于“二步”激励过程所产生的粒子居集数足以补偿前一过程中所减少的，总的居集数将是增加的，第二个激光脉冲出现。此时激光跃迁下能级的激励速率可能变得高于激光跃迁上能级，因为它与离子基态存在着紫外 ( $720\text{\AA}$ ) 辐射的光学联系。只要驱动电流不太高，激光跃迁下能级的自然寿命比起激光跃迁上能级来说要短得多。因此，在适当的离子密度的情况下，粒子数反转是随着电流的增加而增加的。

当驱动脉冲电流高出一定范围之后，这时对离子基态的谐振辐射几乎完全被俘获。激光跃迁下能级的寿命是与离子基态的密度成正比的，而离子基态的密度正比于电流，因此随着驱动脉冲电流的增加，粒子居集数反转密度减少，甚至可能变成负值，使激光跃迁全部抑止<sup>[6]</sup>，没有激光输出。这时的电流值称为熄灭电流。由于离子密度是正比于充气压的，因而熄灭电流值是随着充气压的减少而上升的。

如果脉冲驱动电流的前沿不太陡时，即上升速率不够时，第一个激光脉冲是激发不出来的。

第二个实验结果表示在图3中，上线为激光脉冲的波型(信号为负)，下线为驱动电流的波型(信号为正)。激光器件采用的是可连续工作的  $\text{Ar}^+$  激光器，充有  $0.3\sim 0.4$  托的纯氩。放电管通道直径为4毫米，长600毫米，是由光谱石墨片分段组成的。阴极为钡钨热阴极，阳极由钽皮筒组成。激光管两端采用石英布儒斯特光胶窗片封接<sup>[7]</sup>。

驱动方式采用预电离(辉光放电)状态等待，其维持电流为100毫安左右；然后采用大脉冲电流驱动。这样做可以避免采用较高的电源电压，并能选择最佳驱动电流值进行工作，而不受击穿电压的限制。

在图3中可以看到，在脉冲驱动电流上升的过程中，没有激光脉冲出现，因为在这个驱动过程中，激光跃迁上能级粒子数的居集主要是“一步”过程的作用。而“一步”过程产生激光的阈值，是随充气压的上升而增高的。激光脉冲出现在驱动脉冲电流之后，这主要是由于“二步”(或“串级”)激励的结果。在激励过程中(即驱动脉冲电流的持续时间)，要产生足够高的电子密度和温度才能实现粒子数反转，为此，驱动脉冲电流的持续时间对激光的出现也有一个阈值。影响这个阈值的因素有：阴极在脉冲工作时的发射速率、充气压力、气体成分、脉冲电压以及预电离的维持电流等。适当提高预电离的维持电流，可以使驱动电流的脉冲宽度阈值下降，有利于提高工作频率。另外在氩气中同时充入一些气体作为辅助气体(如  $\text{He}$ 、 $\text{Ne}$  等)，也是有助于提高重复频率的，不过激光脉冲的峰值功率要下降。

我们采用的也就是把可连续工作的  $\text{Ar}^+$  激光器，使它工作在脉冲状态的方法，而要避免在一次脉冲驱动中出现二个光脉冲的现象，确保获得清晰的照片。我们获得的激光性能表示

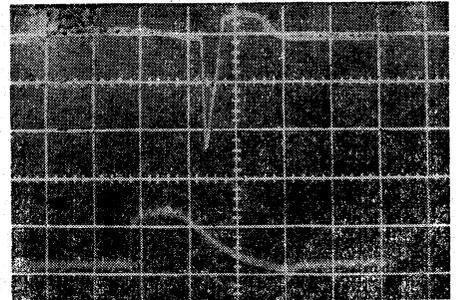


图3 高压  $\text{Ar}^+$  激光器在脉冲电流驱动时输出的光脉冲与驱动电流脉冲的关系  
(上线：激光光脉冲；下线：驱动脉冲电流  
扫描速度：20 微秒/格)

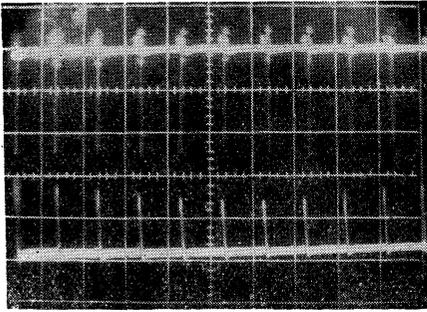


图4 激光光脉冲组与驱动脉冲电流组  
(上线: 激光光脉冲组; 下线: 驱动脉冲电流组  
频率: 1千赫/秒; 扫描速度: 1毫秒/格)

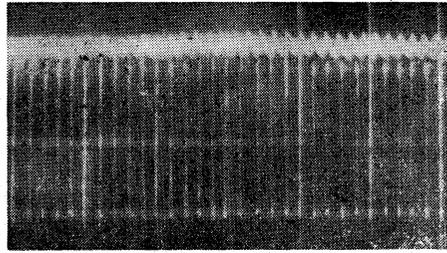


图5 驱动频率为5千赫/秒时的激光光脉冲组  
(扫描速度: 1毫秒/格)

在图4和图5中。图4为重复频率为1千赫的激光光脉冲组与驱动脉冲电流组的示波图; 图5为重复频率为5千赫的激光光脉冲组的示波图。

从上面的这些实验中可以明显地看到, 激光脉冲总是滞后于驱动电流脉冲。这个滞后时间决定于充气压力(气压高, 滞后时间较长)、存在附加磁场与否(有磁场滞后时间较长)以及与驱动电流有关。

实验表明, 激光脉冲输出的功率为数瓦水平时足以保证21定感光片充分曝光的需要, 其感光面积不小于4平方厘米。

驱动电源的组成部分示于图6。组脉冲发生器由外来的同步讯号触发工作, 产生一组(时间可以控制, 我们选用了10~20毫秒, 它与风洞工作时间匹配)频率从几赫到5千赫(可单脉冲输出)的电压脉冲, 并分两路输出。一路进入放大器, 经过隔离脉冲变压器, 去触发闸流管 $GQ_1$ 导通, 对仿真线 $LC$ 网络充电, 然后截止; 另一路经过延时器, 将讯号延迟一个时间后, 进入放大器, 经隔离脉冲变压器, 去触发闸流管 $GQ_2$ 导通, 仿真线 $LC$ 网络对激光管放电。在这之前,  $Ar^+$ 激光管是被启辉电源预先电离导通。若维持电流取100毫安的话, 此时激光管的内阻大约是3000欧姆左右。当闸流管 $GQ_2$ 导通时, 它的内阻急剧下降到几欧姆(甚至更低), 形成弧光放电, 激励激光管输出激光。

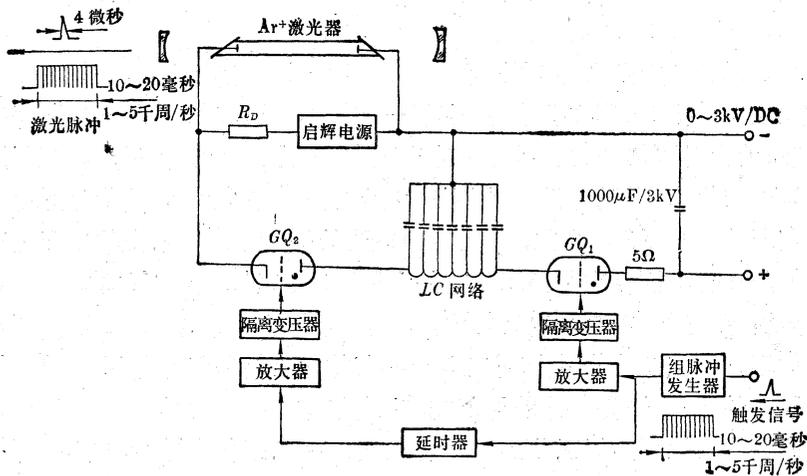


图6 驱动电源示意图

能源是一个0~3千伏的直流电源和大容量电容器(500~1000微法)组成。设计成可调式,是为了适应对不同激光管的最佳驱动脉冲电流的需要。即使是同一支激光管,它的气压改变之后,最佳驱动脉冲电流也要发生变化。

利用 $Ar^+$ 激光作为脉冲光源,与纹影仪相配合,在激波管风洞的实验中,对流场进行显示照相,即要把在高速气流中运动的实验模型,及其对周围流场所产生的物理现象——激波、膨胀波系、边界层以及尾迹流等的形状显示出来。

实验的布置如图7所示。在实验中,电源设备和照相机都是处在等待状态,由风洞上发出的同步讯号触发动作,保证了捕捉现象的准确性,因为激波管风洞建立准定常超音速流的时间只有几毫秒。

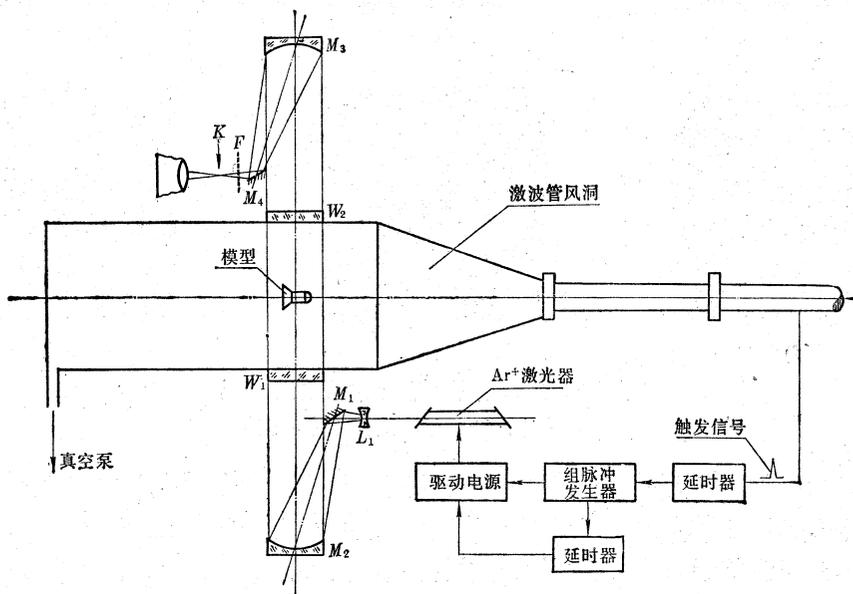


图7 激波管风洞光学测量仪器布置图

图8和图9是采用单次脉冲激光输出所摄取的流场照片,其曝光时间为4微秒(即光脉冲的半宽度)。实验时的 $M$ 数为9.2,来流气压为 $2 \times 10^{-2}$ 千克/厘米<sup>2</sup>。在这种情况下,模型头部产生的正激波所引起的光程变化为 $1.27 \times 10^{-4}$ 厘米,比在大气压下直接实验时小一个量级。模型其他部位产生的斜激波和膨胀波系的强度就更弱了;但在我们的照片中显示得十分清楚,特别在图9中可以清楚地看到激波的相互作用、滑流层以及激波在模型壁面上的反射,都十分清晰。

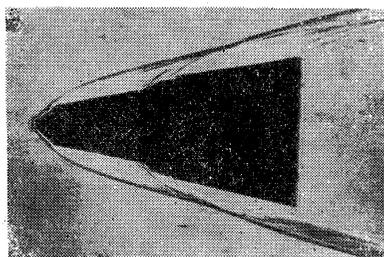


图8 单模型自由飞流场照片

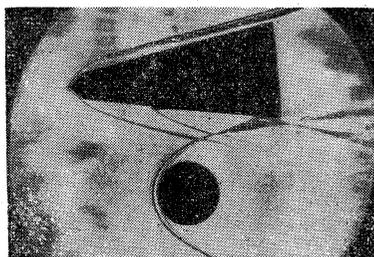


图9 双模型自由飞流场照片

图 10 是用重复频率为 2 千赫的激光脉冲组, 采用转鼓相机记录, 拍摄的激波管风洞的建立稳态超音速流之后的结尾过程。即气流由稳定的超音速流(图 10 中 a、b), 逐步降下来(图 10 中 c、d、e 和 f) 的过程。

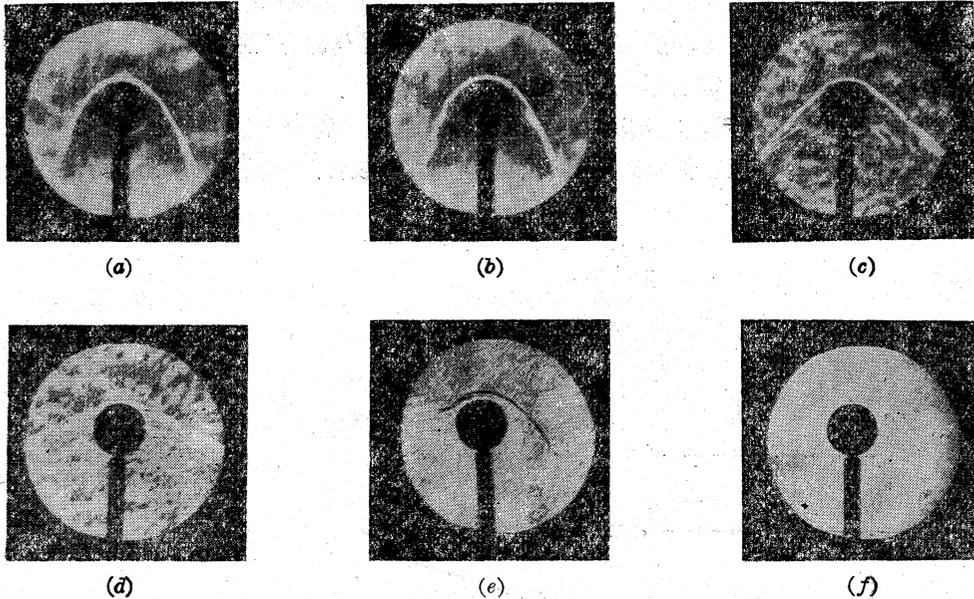


图 10 激波管风洞气流过程的结尾情况  
(拍摄频率: 2 千幅/秒(即光脉冲频率))

总之把  $\text{Ar}^+$  激光管预先电离, 用脉冲电流去驱动它, 避开了器件的消电离问题可以获得较高的重复频率, 较窄的激光脉冲, 可作为高速摄影的高频闪光光源, 这在我们的工作中得到了证实。此外, 还可应用于高速全息摄影、干涉计量、等离子体密度测量、气动力激光、爆炸力学、燃烧、火焰等方面的研究工作。

### 参 考 资 料

- [1] W. B. Bridges; *Appl. Phys. Lett.*, **4**, No. 7, p. 128 (1964)
- [2] W. R. Bennet et al.; *Appl. Phys. Lett.*, **4**, No. 10, p. 180 (1964)
- [3] E. F. Labuda, E. I. Gordon et al.; *IEEE Quant. Electr.*, **QE-1**, p. 273 (1965)
- [4] R. I. Rudko, C. L. Tang; *Appl. Phys. Lett.*, **9**, No. 1, p. 41 (1960)
- [5] W. B. Bridges, A. S. Halster; AD-814897, May (1967)
- [6] P. K. Cheo, H. G. Cooper; *Appl. Phys. Lett.*, **6**, No. 9, p. 177 (1965)
- [7] 上海灯泡一厂资料: “氩离子激光研制小结”。

### 更 正

- △ 1976 年第 3 期第 44 页倒数第 11 行“碳、氯、钠、溴”中的“钠”应改为“铷”。
- △ 1977 年第 1 期第 20 页, “椭圆形形激光器聚光腔的铣削加工法”一文作者“戴敏刚”应为“戴毓刚”。