

# 闭合循环横向电激励 CO<sub>2</sub> 激光器

中国科学院力学研究所流动激光器小组

本文着重研究闭合循环连续输出 CO<sub>2</sub> 激光器的一些特性。

## 一、实验装置

实验装置的示意图如图 1, 由鼓风机、腔体、换热器等三部分组成。工作气体在放电区被加热后, 经换热器冷却, 又被鼓风机吹进腔体进行再循环。腔体气流入入口处截面 (5×28) 厘米<sup>2</sup>, 流速约 25 米/秒, 流量约 1260 米<sup>3</sup>/小时, 换热器的换热量约 50000 大卡/小时。

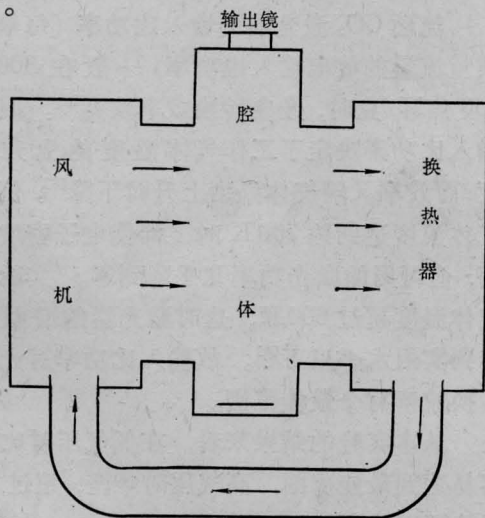


图 1 实验装置示意图

电极结构: 阴极是一个  $\phi 10$  毫米的铜管, 管内通冷却水。阳极由 12 块铜片组成, 长 10 厘米, 宽 1.4 厘米, 各片间隔 0.5 厘米, 两端为半圆形。前端与阴极对齐如图 2。阴、阳极间距 3.6 厘米。阳极接正高压, 每片阳极各串一限流电阻, 每片之间电绝缘。阴极

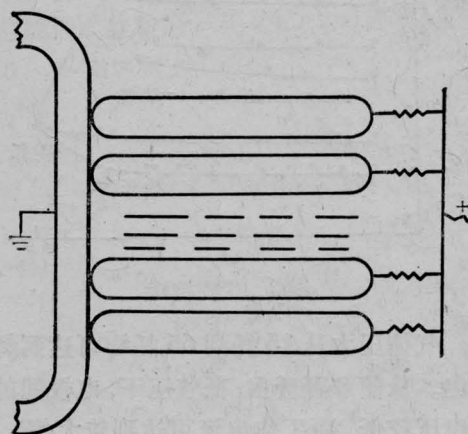


图 2 电极结构

接地。

为保证阴、阳极能在较低电压下起辉, 安装一触发电极。触发电极与阴极距离约 5~6 毫米, 触发电压小于 1000 伏, 电流小于 100 毫安。

电源为 100 千伏安的变压器。硅堆整流, 最大电流约 10 安培, 最高电压 10000 伏。

## 二、放电特性

对大功率流动 CO<sub>2</sub> 激光器而言, 首先要解决高气压下的稳定均匀辉光放电。弧光<sup>[1]</sup>不但对激光输出非常有害, 而且也容易损坏电极, 使之不能正常工作。

放电实验是在气体流速 25 米/秒, 气体比分 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He=5:23:72 条件下进行的。归纳实验数据得出伏安特性曲线, 见图 3。

实验结果表明: 输入电功率在 4000 瓦以

收稿日期: 1978 年 7 月 17 日。

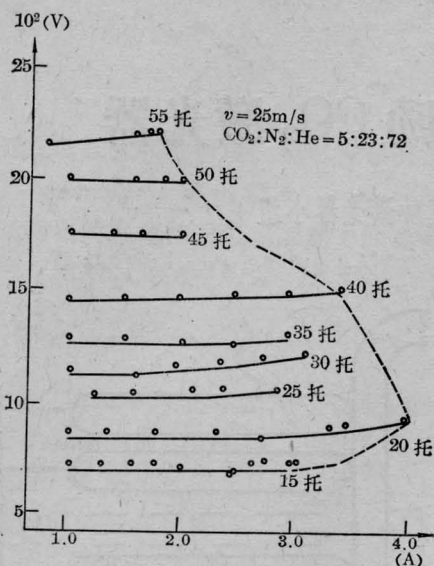


图3 伏安特性

内, 气体压力从 15 托到 55 托均可达到辉光放电。从图 3 可看出, 低气压下, 电极间的工作电压较低, 而工作电流可达到较大值。随气体压力增高, 工作电压不断增高, 而电流减小。各种气压下电流都有一个最大值, 大于此值时马上出弧光, 所以激光器不应在极限电流状态下工作。

从观察实验现象来看, 工作气体压力在 40 托以下放电较稳定。大于 40 托虽能维持辉光放电, 但不稳定, 电流有所跳动。气压愈高电流跳动愈严重。

放电时在阴极附近始终存在一个暗区, 即通常所说的法拉弟暗区。气压愈低暗区愈大, 气压愈高暗区愈小。放电区形状如图 4 所示。

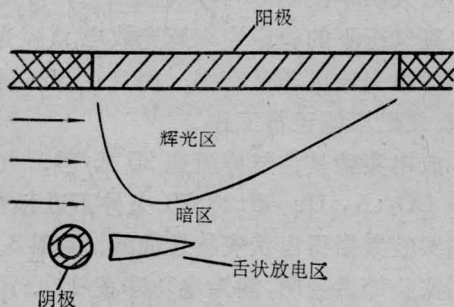


图 4

除辉光区及暗区外, 在阴极下游还存在一个亮区, 其形状类似一个舌头。此区也和工作气压及电流有关, 随气压及电流加大而变粗变长。当电流加大到一定值时, 舌头的尾部和阳极下游连起来, 最后变成弧光放电。这种现象在高气压中更为明显。如前所述, 工作气压高于 40 托时, 放电电流不稳, 主要原因是舌状放电区不稳定造成的。由于阴极横截面是圆形, 造成流场不均匀。阴极下游一侧流速低, 容易造成局部气体温度较高。从而使这部分的气体密度减小, 对应的电导率增加, 引起局部电流密度加大, 这样就形成了所观察到的舌状放电。可把它看成初发电弧, 但它并不占据其均匀放电的显著部分。然而, 当输入功率加大时, 舌状放电有收缩成一个窄的电弧通道的趋势, 最后导致成弧光放电。要想去掉或者减小舌状放电区, 必须补偿阴极下游侧的气体流速。通常的措施是在腔体入口处安装一个湍流发生器。

流动  $\text{CO}_2$  激光器的输入比功率 (每单位质量流量的放电输入电功率) 一般在 300~500 焦耳/克时, 光电转换效率较高<sup>[2]</sup>。因为输入比功率决定了工作气体温度的上升程度, 而效率又随气体温度上升而下降<sup>[3]</sup>, 例如气体温度达到约 700 K 时, 即使电子密度很高, 但可用的激光功率几乎降到零。实际上气体温度超过 600 K, 这时激光器的增益已降到实用水平以下<sup>[4]</sup>。故输入比功率对光电转换效率有个最佳范围。

从本实验的结果来看, 在低气压时比较容易达到最佳范围, 高气压时难些, 超过 50 托就更困难, 见下表。

气 压 (托)	20	30	40	50
最大输入电功率(瓦)	4000	3940	5020	3510
最大输入比功率(焦耳/克)	833	554	523	296

纵观整个放电实验情况, 在现有的条件下, 认为 40 托以下, 无论是输入电功率还是放电均匀性及稳定性, 都是令人满意的。

为了维持均匀辉光放电, 要考虑电极的形状, 表面积大小, 表面状态, 冷却效果等。对于循环系统要力求干净, 不能有杂质及灰尘。否则, 杂质随气流流到高温放电区内, 被炭化, 及对流场的干扰, 能引起弧光放电。

此外, 在高气压放电中, 预电离是一项很重要的措施。我们在放电区阴极上游, 安装一个触发电极。使触发极与阴极之间在主放电前, 发生辉光放电, 将气体分子局部电离后, 产生游离的离子及自由电子。这样在电源电压比工作电压稍高一点就可以起辉。一旦起辉后, 触发放电就不起作用了。

### 三、增益特性

设  $I$  为光强,  $L$  为激活介质长度,  $dI$  为光强增量,  $g$  为介质增益, 则表达式为

$$\frac{dI}{I dL} = g \quad (1)$$

它表示光强在传播方向上单位长度内光强增加的百分比。

本实验的增益是用单光束测量方法测试的。探测用的  $\text{CO}_2$  激光器输出功率约 8.2 瓦。以此光强为  $I_0$ , 通过激活介质被放大后的光强为  $I_1$ 。根据定义, 其平均增益为

$$\bar{g} = \frac{dI}{I_0 dL} = \frac{I_1 - I_0}{I_0 L} \quad (2)$$

光强  $I_0$  及  $I_1$  均由热敏电阻探测器接收。

由腔体未放电及放电两种状态, 测出  $I_0$  及  $I_1$  两个数值。由 (2) 式可求出激光器单程增益及增益系数。

本实验主要测量单程增益在不同气压下与输入比功率的关系。归纳实验结果见图 5。

(a) 输入比功率相同时, 不同气压下的增益变化不大。即在实验范围内, 介质的增益与工作气体压力基本无关。

(b) 增益有个峰值, 对应的输入比功率约在 500 焦耳/克左右。

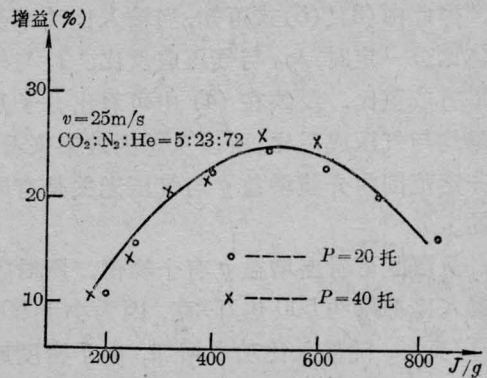


图 5 单程增益与输入比功率的关系

根据受激辐射的基本原理, 介质增益是频率的函数, 也是与光强、各能级的粒子数密度等有关的比较复杂的量。只有当光强趋近于无限小时的增益称作小信号增益, 用  $g_0$  表示。 $g_0$  与光强无关, 只反映工作气体特性。用来表征介质的激活状态, 即粒子数反转状态。

根据二能级模型的理论, 小信号增益表达式如下

$$g_0 = \sigma_s \left( \frac{k_u}{\lambda_u} - \frac{k_1}{\lambda_1} \right) n_e \quad (3)$$

其中,  $\sigma_s$  为受激辐射的截面积;  $k_u, k_1$  为上、下能级激励速率常数;  $\lambda_u, \lambda_1$  为上、下能级弛豫几率;  $n_e$  为电子密度。如果考虑主要是压力加宽时,  $\sigma_s$  与气压成反比,  $k_u, k_1, \lambda_u$  及  $\lambda_1$  均与气压成正比, 因而  $g_0$  与气压成反比<sup>[5]</sup>。

由于  $g_0$  只反映粒子数反转状态, 而处在能级的粒子数跃迁到下能级的速率又只与光强有关, 所以说介质增益是小信号  $g_0$  与光强  $I$  的函数。在压力加宽的情况下, 其表达式为

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (4)$$

其中  $I_s$  为饱和强度。其表达式为

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_s} \left( \frac{1}{\lambda_u} + \frac{1}{\lambda_1} \right)^{-1} \quad (5)$$

其中,  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为光频率。与前叙相同,  $I_s$  与气压平方成正比<sup>[5]</sup>。

因此由(3)、(5)式可知,当输入比功率及气体比分一定时,  $g_0$  与气压成反比,  $I_s$  与气压平方成正比。反映在(4)中可看出分子及分母均与气压成反比。所以从总的效果来看,在一定范围内介质增益  $g$  与气压无关是有道理的。

从图5可看出增益  $g$  有个峰值,所对应的输入比功率约 500 焦耳/克,因为小于 500 焦耳/克时,随输入比功率增加,电子密度加大,所以增益  $g$  上升。而大于 500 焦耳/克以后,由于输入比功率增加的较大,温度的影响成为主要因素,使粒子数反转减小,所以增益  $g$  下降。

#### 四、输出特性

图6是由实验得出的激光输出功率与输入比功率的关系。最大输出功率是在 40 托时,输出 194 瓦,效率 5.2%。实验采用平凹镜单程稳定共振腔。一端用曲率半径 10 米的全反射铜凹镜;另一端用平锗镜孔耦输出。锗镜用水冷却。共振腔长 1 米,输出孔位置在阴极下游约 2.5 厘米处。由图6也可以清

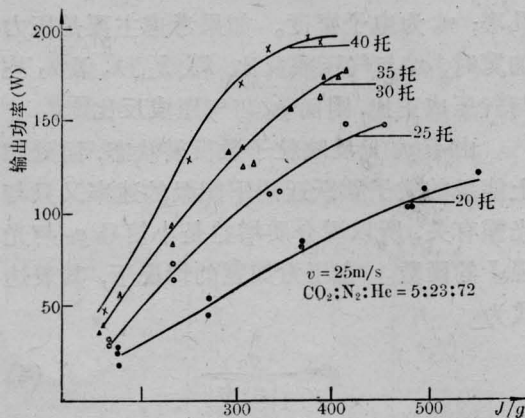


图6 输出功率与输入比功率的关系

楚地看出,输出功率与气压成正比。因为当输入比功率一定时,则腔体内气体温度为定值。这时输入电功率随气压按比例增加,也就是说在相同的条件下,高压时输入到腔体的电功率比低气压时多,所以输出功率是与气压成正比的。

#### 五、结束语

本实验是在高 3.6 厘米,宽 10 厘米,长 28 厘米较小的放电区内进行了放电、增益、输出等参数特性研究。由小型实验结果可以看出,假若流速保持 25 米/秒以上,把放电区长度加大到 1 米左右,应当说输出 1000 瓦没有大问题。

实验结果也表明,为获得高功率输出,气压和流速是两个非常重要的参数,二者乘积代表了气体的质量流量。对于流动激光器而言,总是希望能在大质量流量条件下工作,即在高流速、高压下运转。但要提高流速,势必要采用大型风机,这对激光器小型化不利,使设备庞大,给设计、制造带来了困难,因此尽可能在一般的流速  $v \approx 30$  米/秒下,提高工作气体压力来达到同样的目的。但是在高压下维持均匀辉光放电又比较困难,这也是今后应加强研究的课题。另外,对于大功率激光器,还要考虑选择适合耐高温的窗口材料。

#### 参考文献

- [1] “炭酸カスレーザとその高功率化”,永井治彦等,エレクトロコクス,1973,18, No. 9.
- [2] “CO<sub>2</sub> 激光器”,潘承志.
- [3] “放电对流激光器”,科技参考资料第六集.
- [4] “电激励 CO<sub>2</sub> 激光物理”,科技参考资料第六集.
- [5] “高压力封闭连续 CO<sub>2</sub> 激光器”,《国外激光》,1978, No. 1, 21~25.