

紫外预电离 TEACO₂ 放大器

楼祺洪 何迪洁 于澍生 朱福林

(中国科学院上海光机所)

提 要

紫外光预电离 TEA CO₂ 放大器是作为大功率 CO₂ 激光系统的一种功率放大器。本文采用印刷线路板制成的表面火花列阵作为紫外预电离源,并使用单独的能源供电来控制紫外光预电离的强度,激光放电与预电离之间的时间延迟由可控的延迟触发控制。放大器每立升输入能量为 260 焦耳。小信号增益为 3.8%/厘米。

在我们研制的大功率振荡-放大系统中,振荡器及前置放大器是采用 Snguin 和 Tulip^[1,2] 的结构,它是利用网状电极后面的一列钨针组成的火花隙产生的紫外对激光工作物质进行预电离,并使激光介质达到均匀的高气压辉光放电。在这种结构中,我们已经获得每厘米 3.2% 的小信号增益。随着高气压大功率激光系统的发展,需要较大口径的高增益 TEA CO₂ 放大器作为毫微秒 CO₂ 激光脉冲的功率放大器。由于上述的结构只有一排火花隙,并且与主放电公用一个电源,为此,我们研制了将预电离及激光主放电电源互相独立的紫外光预电离放大器。它的主要特征是:用印刷线路板制成的表面火花隙列阵作为紫外预电离源,并使用单独的能源供电来控制光预电离的强度。另一方面用可控的延迟触发器控制预电离及激光主放电之间的时间延迟。实验结果表明在 43×35×470 毫米³ 的放电体积中,每立升可输入能量 260 焦耳,小信号增益系数可达到 3.8%/厘米以上。在激光气体中掺入低离化电位的种子气体可大

大提高放电的均匀性。这些结果为进一步研制较大口径的同类型器件提供了设计基础。

一、器件的结构及实验条件的确定

1. 结构

图 1 给出紫外光预电离放大器的装置原理图。

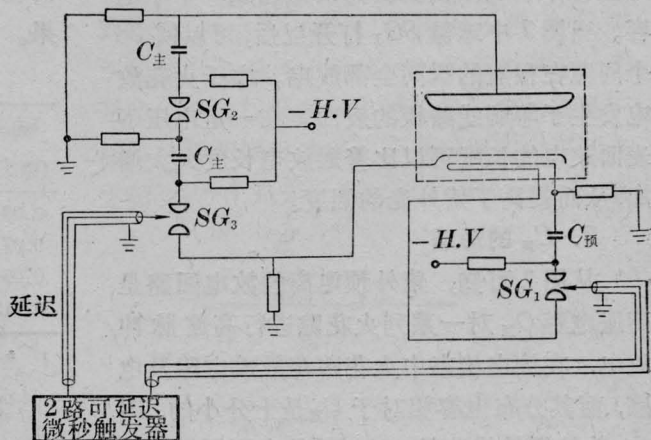


图 1 TEA CO₂ 放大器实验装置图

图中,虚线框内是放大器的器件部分。整个器件安装在长为 760 毫米,内径为 140 毫

收稿日期: 1978 年 4 月 10 日。

米的透明有机玻璃管中, 阴极用硬质铝加工成儒可夫斯基形^[3], 电极表面经喷砂处理可以增加放电的均匀性。阳极用不锈钢丝网编在儒可夫斯基面型的有机玻璃框架上, 电极间距为 35 毫米。根据放电照片测得, 放电区的宽度为 43 毫米, 放电区的长度为 470 毫米。

作为紫外预电离源的火花隙位于不锈钢丝网后面约 10~20 毫米处。它由厚 2 毫米的双面印刷线路板制成, 其结构如图 2 所示。

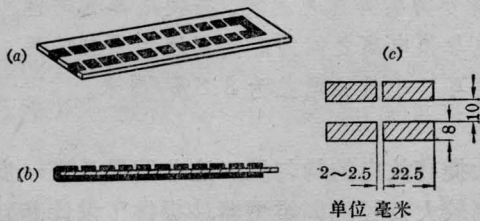


图 2 预电离火花隙结构

经过反复实验确定火花隙共用二排, 每排由间隙为 2~2.5 毫米, 宽度为 8 毫米的 19 个火花隙组成, 共有 38 个火花隙。在印刷线路板反面对应火花隙的位置上也保留线路板上的铜箔, 其剖视图由图 2[b] 给出。每一个电极与印刷线路板反面的铜箔组成一个小电容。当图 1 中球隙 SG_1 打开以后, 可以使 38 个间隙在很短的瞬间全部放电。由于火花放电发生于印刷线路板的表面, 在一定电压下表面放电的长度可以比普通放电长度大大增加, 从而提高了紫外光的强度。

2. $C_{预}$ 的影响

从图 1 可知, 紫外预电离的放电回路是高压电容 $C_{预}$ 对一系列火花隙进行高速脉冲放电, 在放电状态中火花隙等效成电阻及电感, 而其分布电容相对于 $C_{预}$ 是十分小的, 因此, 总的等效线路是一个 RLC 串联回路。放电电流是衰减的正弦波, 因为火花隙的电阻是很小的^[4], 放电电流最初几个周期可近似为正弦波:

$$i(t) = I_0 \sin \omega t$$

式中: $I_0 = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$ 是放电电流峰值,

$\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}$ 是放电电流的振荡频率。

对于一定的供电电压 V_0 , 紫外光的发光效率直接正比于电流的最大强度^[5], 因此增大预电离电容的容量, 减小整个回路的电感可以增大 I_0 , 从而增大紫外光的强度。图 3 及表 1 给出了我们的实验结果。

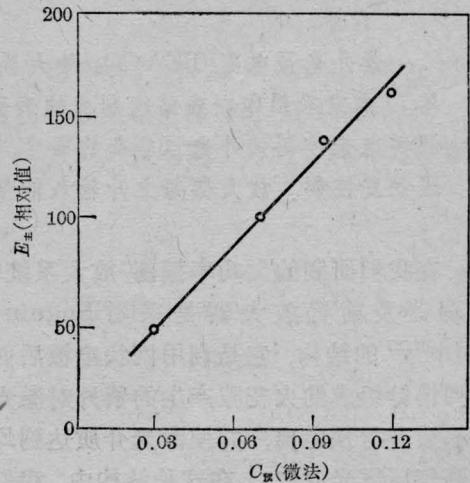


图 3 $C_{预}$ 与主放电输入能量 $E_{主}$ 的关系

从表 1 可知, 当 $C_{预}$ 增大时, 主放电允许的输入能量增大, 这是由于紫外光增强的结果。

表 1 $C_{预}$ 对放大器运转特性的影响

$C_{预电离}$ (微法)	$E_{预电离}$ (焦耳)	时间延迟 τ^* (微秒)	气体成分 ($CO_2:N_2:He$)	总气压 (托)	$E_{主放电}$ (焦耳)
0.03	6	0.8	1:1:8	660	46
0.07	29	0.8	1:1:8	700	100
0.094	56	1.2	3:2:8	760	140
0.118	82	1.6	3:2:8	800	164

* 时延 τ 为预电离与主放电之间的延迟时间

3. 延迟时间 τ 的确定

由预电离火花隙的电路分析表明, 紫外光的发光效率直接正比于电流的强度, 而预电离放电电流要达到最大值需要一段时间。因此, 主放电对预电离要有一个延迟, 曾有人用条纹照相机研究这类器件的放电随时间变

化的情况^[6],主放电比预电离延迟范围在 400 毫微秒到 2 微秒之间,才可以得到均匀的高气压辉光放电。

我们采用一台 RC 延迟的触发器,其时间延迟范围可以从 150 毫微秒到 3 微秒之间变化。图 4 给出二路触发信号之间的延迟。

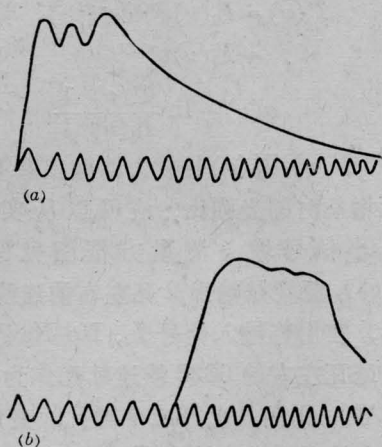


图 4 用高压示波器检测的触发信号
(正弦波是时标)
(a) 未延迟信号; (b) 延迟信号

将触发信号经过电阻分压器输入 OK-19 高压示波器。图 4(a) 表示未延迟的信号,用来打开图 1 中球隙 SG_1 , 图 4(b) 表示延迟信号,用来打开球隙 SG_3 , 图中正弦波是用作定标的高频振荡信号。

我们用实验的方法确定器件运转的最佳延迟时间, 图 5 给出延迟时间对均匀辉光放电的影响。实验的条件是: 总气压 700 托, $CO_2:N_2:He=1.5:1.5:8$ 。从图可知, 较好的时间延迟在 0.8~1.2 微秒。

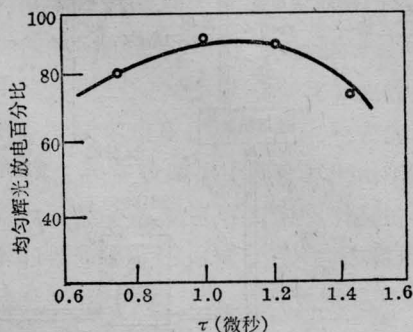


图 5 延迟时间对均匀辉光放电的影响

二、掺杂气体提高放电性能

从图 5 可知, 虽然调整了时间延迟可使辉光放电较好, 但辉光放电稳定性尚待进一步提高。提高放大器输入能量及稳定性的主要途径是提高紫外光预电离的效果^[7]。由于 CO_2 、 N_2 、 He 的电离电位较高 (分别为 13.3 电子伏、15.3 电子伏和 24.5 电子伏), 如考虑单光子离化, 相应要求波长短于 900 埃的紫外光。近期对于紫外预电离火花的光谱研究表明, 对于激光气体产生有效的体积预电离的光谱带只有二个, 一个位于 1200 埃附近, 其带宽约为 50 埃; 另一个是带宽为 100 埃的 1750 埃光谱带。因此, 如果将低电离电位的物质掺入激光工作气体, 就可以大大提高光离化的效果。我们选用正三丙胺作为掺杂物质, 其电离电位为 7.23 电子伏。为了防止正三丙胺水解, 容器必须干燥, 且不能受强光照射以防止氧化。掺杂装置如图 6 所示。

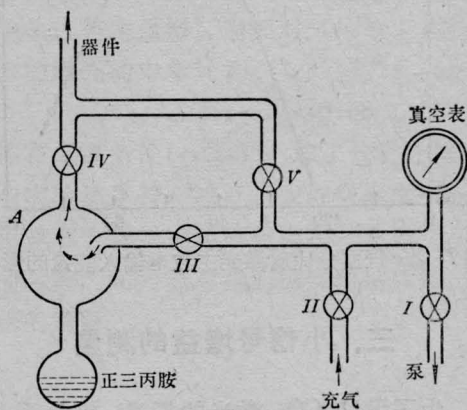


图 6 掺杂正三丙胺气体的充气装置

它是依靠 CO_2+N_2+He 混合气体流经容器 A 而将正三丙胺蒸气带入器件。控制直接经过活塞 V 进入激光器的气体与流经容器 A 进入激光器的气体百分比可以控制掺杂的浓度。表 2 给出改变正三丙胺气体掺入量对激光输入能量与稳定性的改进, 在 He 占 50% 的条件下, 无掺杂已不能获得均匀的

表2 改变正三丙胺气体掺杂量对激光输入能量及稳定性的改进

流经正三丙胺气体的百分数	输入能量 (焦耳/立升)	产生弧光的百分数
0%	< 230	100%
5.3%	250	50%
10~40%	260	20%

辉光放电, 但适当的掺杂就能达到 80% 以上的辉光放电。

工作气体比 CO₂:N₂:He 为 3:2:5, 总气压为 760 托, 室温 28°C。

另外, 我们还作了 He 气百分比对激光主放电输入能量的影响。在掺杂的情况下, 使 CO₂:N₂ 比例在 1:1 到 2:1 之间, 发现 He 占 44~50% 之间可得到最大的输入能量(图 7)。

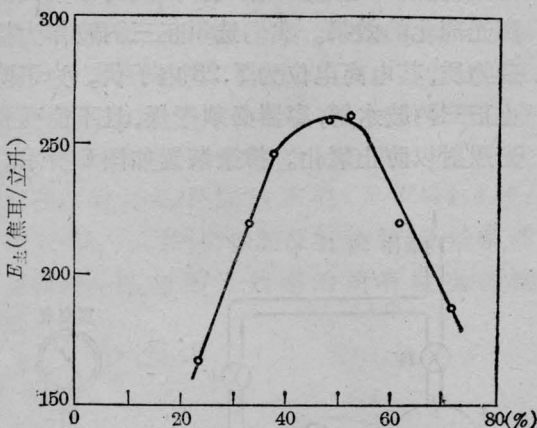


图7 He 气百分比对激光主放电输入能量的影响

三、小信号增益的测量

为了设计 CO₂ 激光的振荡-放大系统, 必须测量放大器的增益^[8, 9]。

令一频率为 ν , 强度为 $I_0(\nu)$ 的光束通过长度为 l 、具有粒子数反转的工作物质, 其强度增加到 $I(\nu)$ 。设增益系数为 $\alpha(\nu)$, 则有:

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{\alpha(\nu)l}$$

$$\alpha(\nu) = \frac{dI(\nu)}{I(\nu)} \frac{1}{dl}$$

所以增益系数 $\alpha(\nu)$ 表示频率为 ν 的光束通

过单位长度的工作物质后光强的相对增长率。实际上, 光通过激活介质除了得到增益以外, 由于输入、输出窗口的吸收、散射、衍射等等会引起损耗, 工作物质的不均匀性引起的吸收、散射、畸变也会引起光的损耗。设这些损耗之和由损耗系数 γ 来表示:

$$I'(\nu) = I_0(\nu)e^{\alpha(\nu)l}e^{-\gamma l}$$

$$= I'_0(\nu)e^{\alpha(\nu)l}$$

$$\alpha(\nu) = \ln \frac{I'(\nu)}{I'_0(\nu)} \frac{1}{l}$$

式中, $I'(\nu)/I'_0(\nu)$ 是放大器输出端有增益时与无增益时的光强比, 它可以由实验上测得。小信号增益测量方框图见图 8, 其中, CO₂ 源管是输出 2 瓦左右的连续 CO₂ 激光器, 它用作输入信号 I_0 , He-Ne 激光管输出 2 毫瓦左右的 6328 埃连续光作为光电控制信号。调制盘上开二个圆孔, 夹角 180°, 分别允许 CO₂ 光与 He-Ne 光通过调制盘。调制盘转速最高可达每分钟 400 转, 10.6 微米与 6328 埃两束光同时分别通过二个圆孔。3DU 型快速硅光管接收 6328 埃的调制光后, 产生 5 伏左右的电信号推动延迟触发器。延迟触发器产生二个信号, 不延迟的信号输到示波器外触发端, 使示波器提前扫描; 另一个时延为 0.1~1 毫秒的信号触发 TEA 放大器使其工作。这样, 经放大的信号就迭加在未放大的调制方波上, 由 HgCdTe 接收器接收, 显示于示波器上。在测量中进入接收

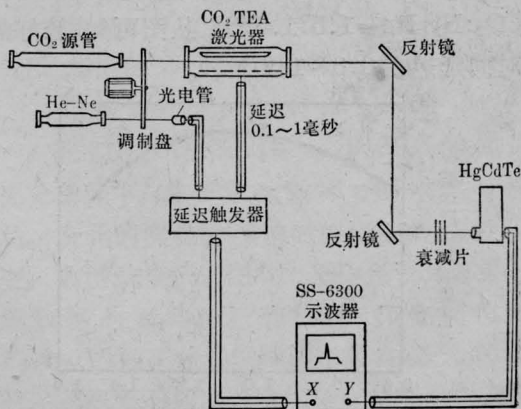
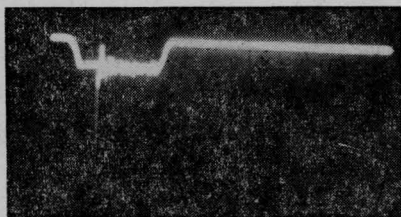


图8 小信号增益测量装置

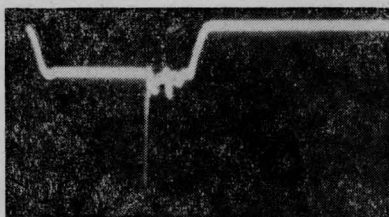
器的信号强度必须进行适当的衰减,使接收器工作于线性响应范围内,以免使接收器饱和。

我们用以上方法测量了放大器的增益系数,其信号波形见图9(a),作为比较,对文献[2]类型的器件亦作了测量,其波形见图9(b)。



(a)

(a) 放大器输入能量 180 焦耳/立升,
CO₂:N₂:He=3:2:8, $\alpha=3.8\%$ /厘米,
纵坐标: 10 毫伏/格,横坐标: 0.5 毫秒/格



(b)

(b) 放大器输入能量 115 焦耳/立升,
CO₂:N₂:He=3:2:8, $\alpha=3.2\%$ /厘米
纵坐标: 5 毫伏/格,横坐标: 0.2 毫秒/格。

图9 增益信号迭加在调制成方波的探测信号上的波形

表3及图10给出不同输入能量的小信号增益系数。

从曲线可知,当放大器的输入能量大于

表3 放大器不同输入能量下的 α 值

放大器输入能量(焦耳/立升)	α (%/厘米)
179	2.9
186	3.1
204	3.2
222	3.4
250	3.3

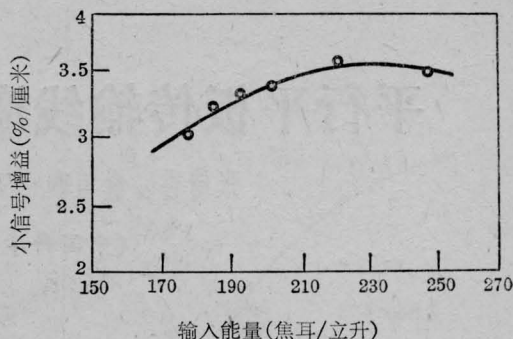


图10 小信号增益随输入能量改变的曲线

一定值时,小信号增益不再增长,这与Reid^[10]等人的结果一致。对于这个问题的解释认为有三种可能:一是当输入能量增大后放电质量下降,引起 α 下降;二是放电温度增加;三是与激光上能级的寿命有关。Reid认为这三个原因均不能合理解释,其原因可能与高压脉冲CO₂放电的基本特性有关。后来,文献[11]认为是温度上升起主导作用。这方面的机理有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] H. Seguin, Tulip; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, No. 9, 414.
- [2] “多节紫外预电离 TEACO₂ 激光器”,五〇一组,《中国科学院上海光机所研究报告集第四集,气体激光器及其应用》,p. 11 (1977)。
- [3] J. D. Carbine; *Gaseous Conductors*, p. 177 (1958).
- [4] F. Frungel; *High Speed Pulse Technology*, Vol. 1, 1965.
- [5] D. C. Meken et al.; *IEEE J., Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, No. 8, 470.
- [6] M. C. Richardson et al.; *IEEE J., Quant. Electr.* 1973, **QE-9**, No. 2, 236.
- [7] H. Seguin et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**, No. 9, 487.
- [8] A. M. Robinson; *Canada J. Phys.*, 1972, **50**, No. 20, 2471.
- [9] R. R. Jacobs; *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, **44**, No. 8, 1146.
- [10] J. Reid et al.; *Opt. Commun.*, 1974, **12**, No. 4, 354.
- [11] A. M. Robinson; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 2, 608.