

重复脉冲光预电离 TEACO₂ 激光器 及其特性

蔡英时 楼祺洪 丁爱臻

(中国科学院上海光机所)

提 要

研制了体积为 $4.5 \times 4.5 \times 50$ 厘米³ 的光预电离 TEACO₂ 激光器, 对单次脉冲运转特性进行了实验研究。在改善各组件的可靠性以后, 选取适宜于重复脉冲工作的最佳参数, 从而使器件稳定工作。该器件的重复率为每秒 1~2 次, 单个脉冲能量 5~6 焦耳, 基本上满足了分离硫同位素的实验要求。

横向激励 CO₂ 激光器的关键技术是高气压下的均匀辉光放电, 自从 1970 年 Beaulieu^[1] 成功地运转第一台横向激励 CO₂ 激光器以来, 已出现了几十种结构。CO₂ 激光器是分子振动能级之间实现粒子数反转的激光器, 并能高效率运转, 希望放电场强低而电流密度高^[2]。但是, 在这种条件下气体放电往往变成不稳定, 利用电子束注入^[3] 或者紫外线预电离^[4] 可以使气体均匀辉光放电。本文所介绍的是一台放电体积为 $4.5 \times 4.5 \times 50$ 厘米³ 的紫外预电离 CO₂ 激光器和它的工作特性, 并选取了适宜于重复脉冲工作的最佳参数, 使器件能较长时间的稳定工作。

一、器 件 结 构

图 1 (上) 给出横向放电器件的结构原理图, 器件安装于 $\phi_{\text{内}} 140$ 毫米的有机玻璃管内, 管壁厚 10 毫米; 激光器的阴极是由成型刀具加工的曲面电极, 成型刀具根据儒可夫斯基型均匀场电极的曲线在线切割数控机床上加工^[5]。电极外尺寸为 $1.8 \times 10 \times 64.0$

厘米³。曾分别采用紫铜、硬铝和高纯石墨作电极材料, 实验结果表明石墨电极(经过高温

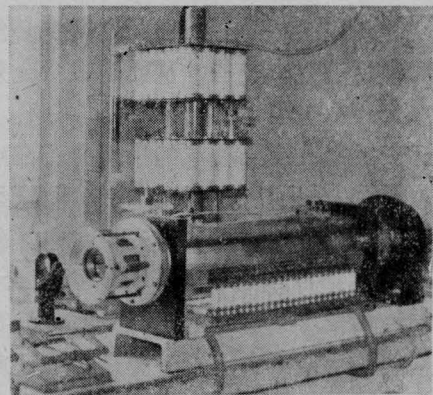
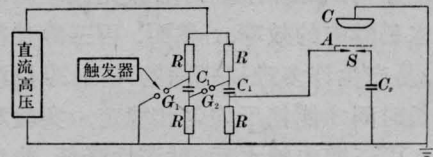


图 1 器件原理图

- C—儒可斯基夫型石墨电极;
- A—阳极(用不锈钢丝网或打孔铜板制成)
- S—钨针火花, 火花间距 2 毫米(28 对);
- C₂—预电离电容;
- C₁—储能电容(0.12~0.18 微法);
- R—充电限流电阻(100~200 千欧);

收稿日期: 1978 年 5 月 4 日。

除气及清洁处理)具有更好的放电稳定性,并可提高输入能量 20~60%,其原因可能是石墨的电阻率比金属大三个数量级,从而起限流作用,保证均匀放电。

激光器的阳极由不锈钢丝网组成,用作预电离的火花针由直径为 2 毫米的钨针制成,针间的距离为 2 毫米,两对火花之间距离 20 毫米,火花距网状阳极 5 毫米。每一对钨针连接一个 $C_s=330$ 微微法的电容。电源由二级同轴结构的麦氏高压发生器组成,当触发器将球隙 G_1 打开以后,电容 C_1 对耦合电容 C_s 充电,并使 28 对火花同时打开,产生紫外光。当耦合电容 C_s 充电完毕,主放电体积内产生预电离之后, C_1 通过阳极与阴极之间产生放电,同时耦合电容 C_s 上的电能亦在主放电中释放。

激光腔长 87 厘米,采用平凹腔,凹面镜的曲率半径为 5~10 米。输出采用厚为 3~4 毫米的锗标准具,用 SP-100 红外分光光度计测得其在 10.6 微米处的透过率为 47% 左右。

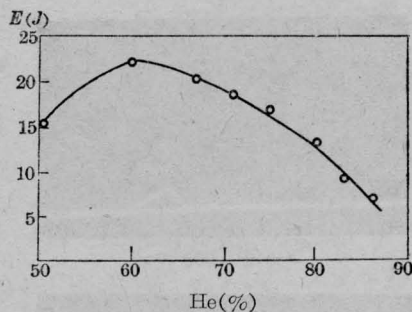
二、单脉冲运转的特性

为了寻求不同气体比分下的最佳工作条件,在一定的场强下研究了 N_2 和 He 的百分比对激光输出能量的影响,其结果如图 2 所示。当 $CO_2:He=1:3$ 时, $CO_2:N_2$ 的比份在 1:1 到 1:2 范围都可以得到较强的激光输出,而 He 气的百分比则在 60% 为最佳。在上述特性研究基础上,在

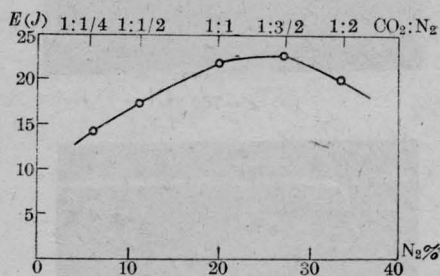
$$CO_2:N_2:He=1:1:3,$$

输入能量为 185 焦耳时,达到 23 焦耳的激光输出,其效率为 12.4%,单位体积输出能量 22.5 焦耳/立升。

在 $CO_2:N_2:He=1:1:4$ 时,输入能量与输出能量的关系由图 3 给出。只要保证均匀放电,系统的效率随输入能量增大而提高。这些气体比份对激光输出的影响要由动力学过



(a) 在 $CO_2:He=1:1$ 时, He 气百分比对激光输出的影响



(b) 在 $CO_2:He=1:3$ 时, N_2 气百分比对激光输出的影响

图 2 气体比份对激光输出的影响

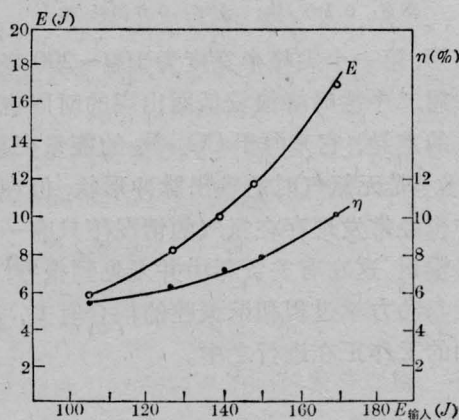


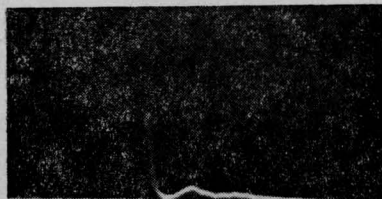
图 3 $CO_2:N_2:He=1:1:4$ 时输入能量与输出能量、器件效率的关系

程的分析^[6]进行解释,我们的结果大致上与理论分析相符合。

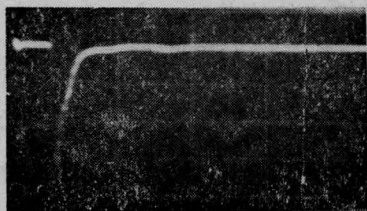
用光子牵引接收器测量了激光脉冲的输出波形,其典型结果如图 4 所示。接收器直径为 25 毫米。信号直接或经放大器由 SS-212 示波器接收。图 4(a)(b)是典型的激



(a) $P=300$ 托



(b) $P=760$ 托



(c) $P=560$ 托

图4 典型的激光脉冲波形

垂直: 0.1 伏/格; 水平: 0.5 微秒/格

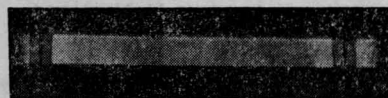
光波形, 第一个尖峰半宽度为 $100 \sim 200$ 毫微秒, 第二个次峰峰值较低而出现的时间也有很大的差异, 它来源于 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 的能量交换; 图 4(c) 是无氮气时的输出脉冲形状, 但在实验中也经常发现存在氮气的情况下只有一个尖峰输出, 这在有关资料中并未见到报导, 它可能与动力学过程和谐振腔的耦合有关, 这方面的工作正在进行之中。

三、重复率运转

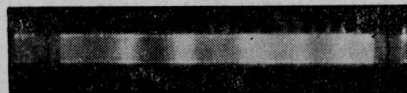
以上单脉冲运转的器件虽然已达到每立升 22.5 焦耳的输出及 12.4% 的效率, 但放电的稳定性受到气体分解的影响, 其最重要的为放电中 CO_2 变成 $\text{CO} + \text{O}$, 若用换一次气均匀放电的次数来表征其稳定性, 一般次数为 15 次左右, 而高能量输出时仅为 $2 \sim 3$ 次^[7], 这给器件的应用带来很大的限制。为

此对原有器件进行了改进, 研制了一台重复率运转的器件。在研制中, 器件作了如下改进:

(1) 原有激光器的阳极由不锈钢丝网制成, 经过热处理及退火的不锈钢丝网在新装入器件时, 基本上能保持优良的平整度, 其放电特性由图 5(a) 给出, 虽然有一些阴暗不匀的区域, 但基本上是均匀的; 由于经过一段时间工作以后, 应力畸变使网状电极呈现波纹状的结构, 放电明显不均匀, 如图 5(b) 所示, 几个明显的亮区对应网的突出部分, 这种畸变严重影响了放电的稳定性, 甚至会出现不希望有的弧光放电。为此, 我们采用刚性和导电性较好的黄铜板, 用 $\phi 2.3$ 毫米的钻头均匀钻孔, 电极面积为 5×50 厘米², 几何透过率为 50% (不锈钢丝网的透过率为 $\sim 7\%$), 结果表明放电稳定性和均匀性大大提高(见图 5(c))。一次换气均匀放电次数在 40 次以上。由此可见, 由于电场均匀性的改进, 虽然紫外光的透过率减小, 仍能使放电稳定性大大改善, 如能寻求刚性好而透过率大的材料, 必将进一步改善器件性能。



(a)



(b)



(c)

图5 TEA CO_2 激光器的放电均匀性照片

(a) 新制的网状电极放电照片; (b) 网变形后放电不均匀; (c) 铜板打孔电极的放电照片(右部较亮是由于右边球隙的发光引起的)

(2) 减少器件的放气, 控制使用的材料。原有器件的法兰及引线不少采用环氧树脂封装, 一方面它在放电下会泄放出有害气体, 另

一方面由于温度的变化,被胶合的两种物体的膨胀系数不同造成慢漏气现象,在实验中往往因季节的更换而发生慢漏气。为此在改进的器件中,有机玻璃之间全部用氯仿胶合,有机玻璃与金属之间(包括二十八个预电离电容与钨针的连接)全部采用O型橡皮圈密封,从而进一步提高了器件的密封性能。

(3) 气体流动技术

一般材料在真空中均会放气,其出气速率由表1给出^[8],因此以有机玻璃为主体的器件出气是较多的,为了充一次气而多脉冲运转,必须改换器壁材料。目前已经报导了封离式的TEACO₂激光器^[9],其外壳用硬质玻璃制成,并需控制管内材料,经过长期反复的高真空处理,手续十分复杂。另外,在封离式器件中还会出现气体的分解,根据Wiegand和Nighan^[10]的分析,在电激发激光器中,电子碰撞CO₂和N₂分子形成CO和O、N原子,这些产物还会组成各种离子和分子,例如NO、NO₂、N₂O、O₂、O₃、O₂⁻、CO₄⁻、NO₂⁻、O⁻、NO₃⁻等,它们引起的吸附复合会使放电不稳定性增加。因此,为了在实验室内重复脉冲工作,一般采用气体低速流动技术。在单次脉冲特性研究的基础上,经过反复实验,确定工作气压660托,气体比分CO₂:N₂:He=1:2:10;单脉冲能量输出为5~6焦耳,脉冲重复率为每秒1~2次。作为比较,表2给出了单次脉冲运转与重复率运转的特性。在这种最佳参数条件下,气体流量小于每分钟1立升,器件能够较长时间地稳定可靠运转。

上海有机化学研究所用了上述器件进行S³²F₆和S³⁴F₆同位素的分离实验,S³²的红外吸收峰正好位于激光输出的波段,分离前S³²的丰度为95%,S³⁴的丰度为4.2%,总气压为4托,经过约2500次照射浓缩度达300~500。器件的稳定性可保证研究工作的顺利进行。

对中国科学院上海有机化学研究所王龙

表1 一些材料在真空中的出气速率^[8]

材 料	出气速率(托·升/秒·厘米 ²)	
	10 分钟	1 小时
胶 木	4×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵
有 机 玻 璃	2×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁶
聚 乙 烯	3×10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
聚四氟乙烯	2×10 ⁻⁶	4.5×10 ⁻⁶
真空橡皮管	10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁶
金属(铜、铝、铁、镍、钢)	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁸	

表2 单次脉冲工作与重复率工作的特性比较

	单次脉冲工作	重复率工作
输入能量	185 焦耳	85 焦耳
输出能量	23 焦耳	5~6 焦耳
效 率	12.4%	~7%
气体比分 CO ₂ :N ₂ :He	1:1:3	1:2:10
重 复 率	1 次/分	1~2 次/秒
充气一次均匀放电次数	3~15 次	>100 次
气体流动后* 均匀放电次数	—	有长期稳定性

* 气体流量 <1 立升/分

根同志在工作中给予的大量协助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. Beaulien; *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 504(1970).
- [2] W. L. Nighan; *Phys. Rev.*, **A2**, 1989(1970).
- [3] C. A. Fenstermach *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 56(1972).
- [4] H. Seguin, J. Tulip; *Appl. Phys. Lett.*, **21**, 414 (1972).
- [5] J. D. Carbine; *Gases Conductors* (1958).
- [6] S. T. Kast, C. Cason; *J. Appl. Phys.*, **44**, 1631 (1973).
- [7] “多节紫外光预电离 TEACO₂ 激光器”,中国科学院上海光机所研究报告集,第四集,11(1977).
- [8] “一些国产材料的出气速率及其在真空设计中的使用方法”,《真空技术》,No. 2, 47(1973).
- [9] D. S. Stark *et al.* *IEEE, J. Quantum Electronics*, **QE-11**, No. 9. 774(1965).
- [10] W. J. Wiegand, W. L. Nighan; *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 583(1973).