

# 电弧涂层螺旋电极无声共振 放电二氧化碳激光器

傅以勇 阎伟中 刘海北

(中央大学光电科学研究所, 台湾)

郇唯诚

(工业技术研究院工业材料研究所)

**提要** 研制成功了共振逆变器激励无声放电快速轴流二氧化碳激光器,其电极是以电弧涂层法制作,覆盖于石英放电管的外壁。电极几何形状采用了平行和螺旋等方式,实验证明螺旋电极比平行电极的放电更为均匀,输出也较高。此激光器以  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 17 : 2$  的混合气比及 5 kPa 的氧压操作,输出 225 W 功率时能量转换效率 8%。

**关键词** 二氧化碳激光器,无声共振放电,涂层电极

## 1 引言

目前工业二氧化碳激光器,其激励方式有直流、高频交流、射频和微波放电等。我们所制作的共振逆变器(inverter)激励无声(或称高频交流)放电<sup>[1]</sup>,采用适当介电常数放电管及管外电极的几何形状,在没有任何特殊调制的快速轴流条件下,获得均匀的自持放电。

我们提出一种新的电极制作方式——热喷涂法。热喷涂法已经广泛应用于飞机引擎、涡轮机叶片、炼钢厂滚洞及民用产品的制造等,而用来制作高频激光器电极,可以说是一种新的尝试。

电极几何形状对放电的影响,在 B. Walter 等人<sup>[2]</sup>的文章中已做过讨论,不过他们所采用的是射频激励方式。至于使用高频交流激励的则有 M. Kuzumoto<sup>[3]</sup>, E. Clavier<sup>[4]</sup> 等的论文报道。针对弯折黄铜电极,是以改变电极的几何形状,来观察对高频交流放电的影响;至于以热喷涂法所制作的电极,则选用了两种形式:一种为平行式,另一种为螺旋式,也做了相互比较。

实验结果证明以热喷涂法制作的电极,比弯折铜片所制成的,其放电的均匀性高而且接线夹具安装容易。比较平行与螺旋电极,证实螺旋电极确实比平行电极放电更为均匀,与其他激励方式的二氧化碳激光器相比,本激光器的特点之一是工作气体中含氮量很高而含氦量很低。以下分述各类型电极的制作、激光器结构、放电实验以及激光器特性等。







## 2 电极制作

本实验比对了弯折铜片及喷涂等两种管外电极。

### 2.1 弯折电极

弯折电极的材质选用黄铜板,板厚 1 mm,使用 AMADA RG-50 折床,依所要求的形状分段折弯,各型电极之形状见表 1。

Table 1 Copper plate electrode geometries

No.	Shape	width (w)	arc length (s)
1		1.7cm	1.9cm
2		1.9cm	2.1cm
3		2.3cm	3.0cm
4		2.8cm	3.5cm
5		3.6cm	
			

### 2.2. 电弧热喷涂电极

先利用热源将喷涂材料加热熔化,再靠热源自身动力或外加压缩气流,将熔滴雾化或推动熔料成喷射的粒束,以一定速度喷射到基体表面形成涂层。在喷涂时如果采用高温热源,超音速喷流以及保护气体,可以消除涂层中的夹杂氧化物和气孔,的确可以改善涂层的结构和性能。目前应用于热喷涂的热源类型,有气体燃烧及气体电弧放电等。我们采用电弧作为热源,将二根金属(喷涂材料)丝作为自耗性电极,利用其端部所产生的电弧作为热源来熔化金属,并辅以压缩气流使其雾化以进行喷涂。电弧喷涂的优点,至少有制程简单,施工价格便宜且在极短时间内就能完成,以及涂层和基体间结合强度高因而不易脱落等。

基体可为玻璃或石英管,涂层可为铝。由于玻璃导热性差,耐电压值低,在喷涂时常发生断裂,且在放电时易被较强电场击穿。因此对激光放电管而言,石英管为较佳的基材。

喷涂的工作条件相当重要,尤其是喷砂粗化处理时的砂材颗粒大小,决定了涂层电极内层表面的粗糙度,且此粗糙度对放电均匀性有甚大的影响。涂层电极的形状,有平行和螺旋两种(图 1(a), (b)),规格见表 2。

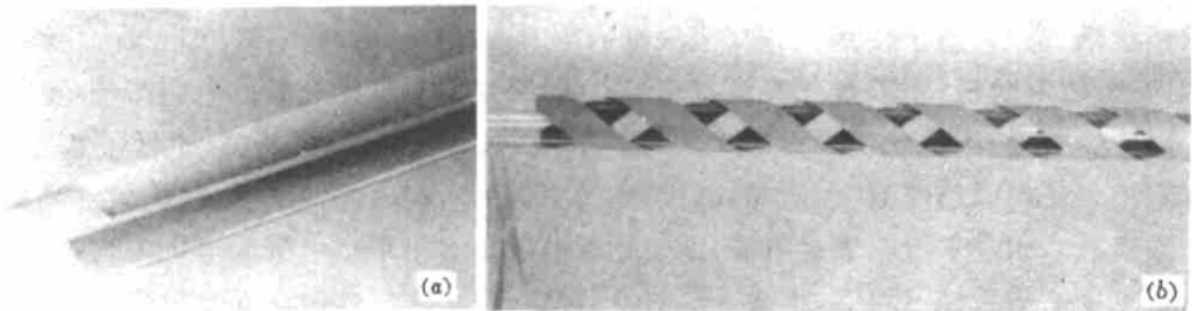


Fig. 1

(a) parallel; (b) helical sprayed electrodes

## 3 激光器的结构

我们所研制的共振逆变器激励无声放电快速轴流二氧化碳激光器,其系统框架如图 2。此系统主要由电源供应器、真空与循环系统、冷却部分、放电管与电极、光学部分以及机械本体所组成。

### 3.1 电源供应器

以串联共振并联负载(简称并联共振)技术,运用 MOSFET 作为半桥式电路的开关元件,所研制而成的共振逆变激光电源供应器。其开关频率在 50~200 kHz 之间,每台可输出电功率 1600 W。

### 3.2 放电管

石英放电管外径 2.5 cm, 内径 2.35 cm, 管长约为 70 cm, 放电(电极涵盖)区单管长度约为 40 cm, 双管则放电区长度倍增。

### 3.3 循环及冷却

为了强化轴流型的冷却,乃利用鲁式(Roots)泵浦来循环在谐振器内部的气体,并利用热交换器来冷却,因此温度之均一性容易达成。

### 3.4 工作气体

CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 及 He 混合气。

## 4 放电实验及激光器整体特性

### 4.1 放电实验

(1) 平行电极 通常电极宽度不太宽时,可视为与平行弯折电极相近似,但电极与管面结合是紧密的。放电较铜板弯折电极为均匀,但仍会有光带存在。如果喷砂颗粒太大,则会在铝涂层电极两侧和顶端尖角处;有绢丝状的放电。平行电极规格见表 2 编号 1。

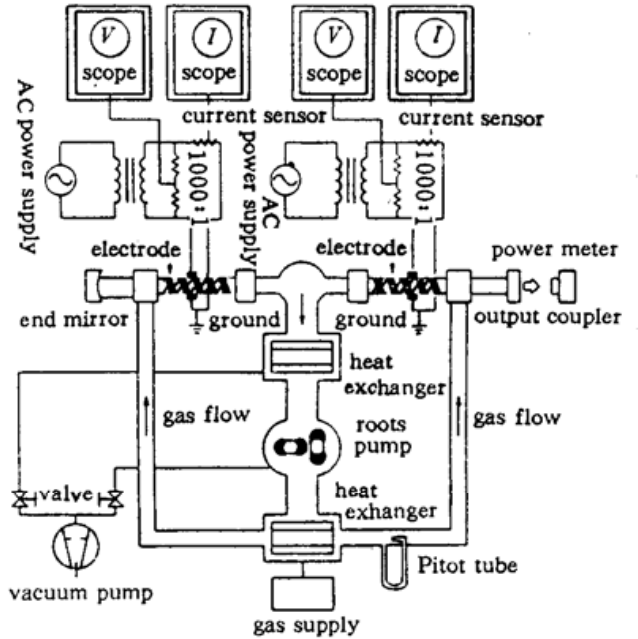
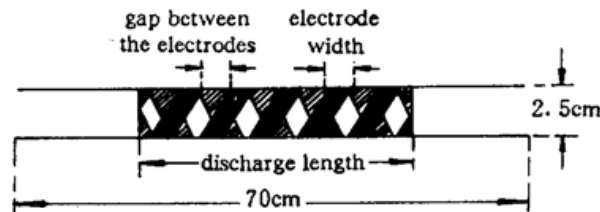


Fig. 2 System diagram of FAF CO<sub>2</sub> laser excited by high frequency AC power supply, geometry of electrodes was the No. 5 listed in Table 2

Table 2 Geometries of parallel and helical sprayed electrodes

No.	Shape	Width (cm)	Length of arc (cm)	Gap between the electrodes (cm)	Discharge length (cm)	Helical total length (cm)	Helical turns
1	Straight parallel	1.9	2.2	2.2	40	40	0
2	Helical	1.5	1.6	1.7	20	26	2
3	Helical	2.0	2.2	1.4	20	23	1.5
4	Helical	1.2	1.3	1.9	19	26	2
5	Helical	1.8	1.9	1.6	40	46	3



(2) 螺旋电极 除了具有平行涂层电极放电较为均匀的特性外,螺旋电极更有平行电极所没有的一项优点,那就是使得电场会因旋转而平均分散在放电管中,更提高了放电的均匀性,图



3 为放电时所拍摄的照片,证明放电的确良好。比较表 2 中编号 2(电极宽度为 1.5 cm),编号

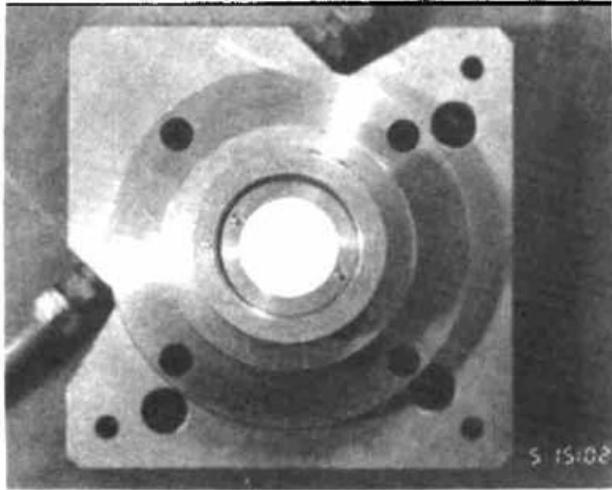


Fig. 3 Picture of the uniform discharge using helical sprayed electrodes

3(电极宽度为 2 cm),与编号 4(电极宽度为 1.2 cm)各电极放电情形,其中编号 2 与编号 3 放电较均匀。对于 2.0 cm 宽的电极而言,在某一特定条件下可使激光的输出(34 W),较之在同一条件下电极宽 1.5 cm 的(29.5 W)为大。问题是 2 cm 宽的电极间距较窄,导致降低了在空气中放电的触发电压,易在放电管外侧形成火花放电。为折衷计乃采用表 2 中编号 5(电极宽度为 1.8 cm,电极间距 1.6 cm)的结构,单段放电区长 40 cm,螺旋圈数 3。

当工作气压为 4.67 kPa,气体混合气比  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 2.25$ ,输出镜反射率为 90% 的条件下,平行涂层电极双管放电时激光器效率约 4.7%。而螺旋电极双管放电时,激光器效率则可达 6.7%。因而在探讨激光器的特性时,仅选择了螺旋电极。

#### 4.2 激光器整体特性

在测量激光器特性时,采用了双管螺旋电极(表 2 中编号 5),谐振腔为平凹稳定型,腔长约 200 cm,高反射率的反射镜为以硅为基底、镀银反射层,曲率半径为 10 m;输出镜计有三面硒化锌平面镜可供使用,反射率分别为 70%, 80% 和 90%。在鲁氏泵浦驱动下气体在放电管中的流速,系以充油皮氏管(Pitot tube)所测得的结果经计算而得,仅为近似值。60 周的供电电压系以自耦变压器调整市电来生升降。高周交流电压及电流以示波器来观察,显示高周周率调整在 105 kHz 时输入功率最高,放电也最为明亮,表示此即线路之共振频率。激光器输出功率以 kW 功率计量测,而后以功率探测计(power probe)读数校正。放电管内之气压及混气分压,皆以机械式压力表测定并以 U 型水银柱比对。

在启动时,必须先施以较高的电压引起较大电流放电,而后再行调整。当放电管中气压较高时,启动放电的电压也须相对提高。因电压是以人工操纵自耦变压器来升降,在启动电压太高时可能因动作稍缓而损害电子元件,是以测试时气压的设定以不超过 5 kPa 为原则。在寻找最佳混气时,先选定  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2$  的比例,再调整 He 的比例到输出功率的最高点,其结果是当输出镜反射率为 80% 及气压 5 kPa 时,以  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 17 : 2$  所输出 225 W 为最高功率。此时激光器的其他参数为:

输出模式  $\text{TEM}_{11}$ , 图 4 为输出光束的一小分量在荧光板上所呈现的图像;光束扩散角约为 4.4 mrad;气体流速约为 230 m/s;激光效率指激光器输出光功率与市电供电功率的比值,约为 8%;小信号增益为  $0.7 \text{ m}^{-1}$ 。



Fig. 4 Picture of the  $\text{TEM}_{11}$  beam mode

图 5 显示了混气比  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$  分别为 1 : 10 : 2, 1 : 14 : 2, 及 1 : 17 : 2 时激光输出功率对市电供电功率的变化。实验证明此激光器在不充氮气时功率衰减亦不大,且其效率亦可达最佳混气比时的 92%。图 6 为 1 : 17 : 0, 1 : 17 : 2 及 1 : 17 : 3 时输出功率的变化情况。

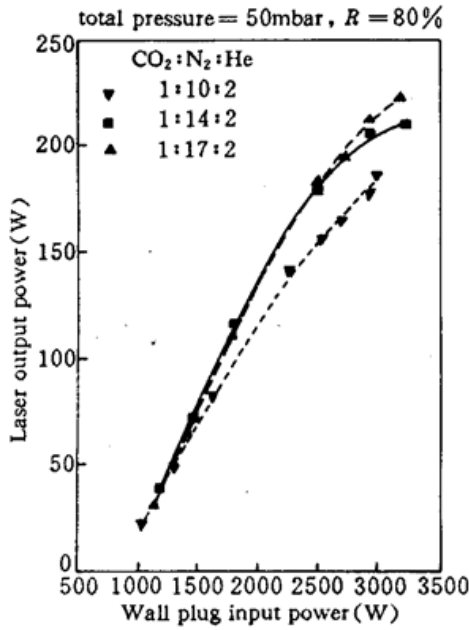


Fig. 5 Laser output powers as functions of input wall plug electrical powers for different gas mixing ratios, CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:16:2, 1:17:2 and 1:18:2 merged together and only one of them was shown

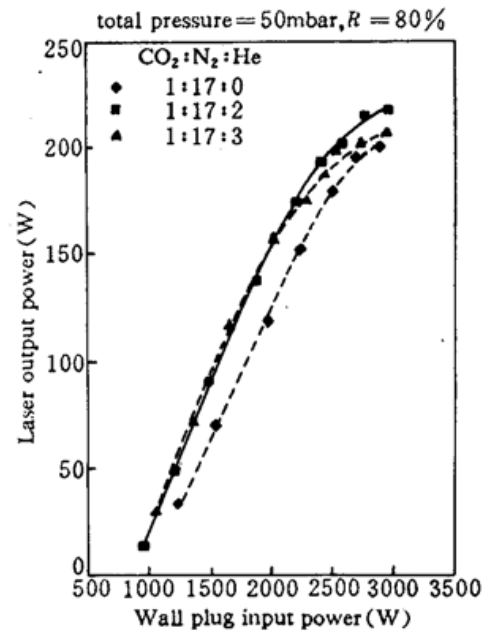


Fig. 6 Laser output powers for different He contents, performance of gas with zero He content was comparable with optimized one CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:17:2

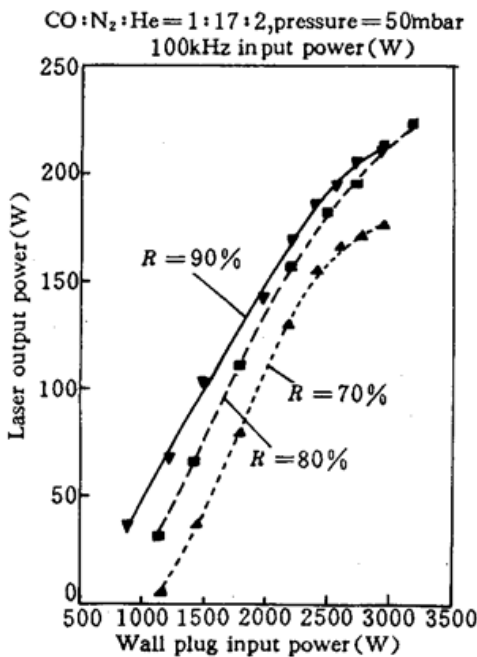


Fig. 7 Laser output powers of different output reflectivities

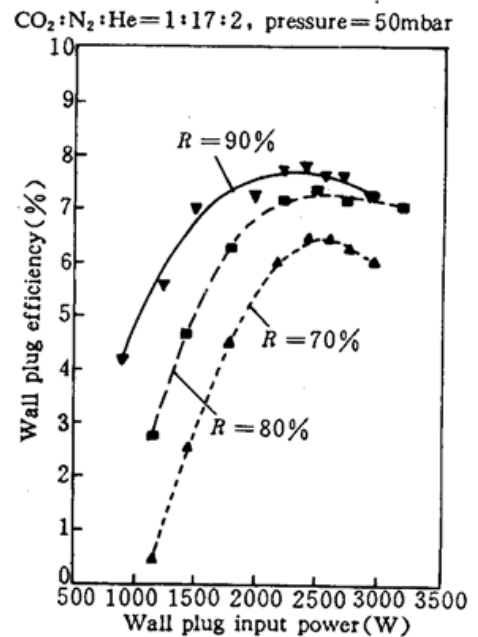


Fig. 8 Wall plug efficiencies of different output reflectivities

图 7 表示输出镜的反射率分别为 70%, 80% 及 90% 时输出功率的变化。而图 8 显示使用此三反射镜的激光效率曲线。可见使用 90% 反射镜时效率一般较高, 唯当输入功率超过 2500 W 后即告下降, 但 80% 者仍可持平。

此激光器的输出功率尚有待提高。提高输出功率应由增高气体压力着手, 但气压提高后, 放电电压亦势必升高。在不再提升供电电压以免损坏电子元件的前提下, 如何升高放电部分的

电压,不外以提高跨管电容( $C$ )或放电周率( $\omega$ ),来降低电容阻抗( $1/j\omega C$ )所引起的压降。这些都是未来的工作项目。有关混合气中氮气比例高而氦的比例低的原因,尚有待研究。

## 5 结 论

本激光器单位长度放电区的输出虽不高,但其氮气的消耗量的确甚低或甚至可以全免,非常有利于在不产氮气的地区使用。电弧涂层方式制作的管外螺旋电极,兼具了制作简便、附着牢固且放电均匀等优点。100 kHz 高周电源供应器制法简单且电子元件价格便宜。这些优点显示出了此激光器的经济价值,值得进一步研讨改良之。

**致谢** 蒙科学委员会对本实验,以编号 NSC-84-2215-E-008-004 号案进行支援。对于华中理工大学邱军林教授的不吝赐教,谨在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 傅以勇. 以共振逆变器激励无声放电快速轴流二氧化碳雷射. 中央大学博士论文, 1995
- 2 B. Walter, M. Bohrer, D. Schuocker. RF-excited- $\text{CO}_2$ -laser with improved electrode geometry. *SPIE*, 1989, 1132: 14~21
- 3 M. Kuzumoto, S. Ogawa, M. Tanaka *et al.*. Fast axial flow  $\text{CO}_2$  laser excited by silent discharge. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, QE-26: 1130~1134
- 4 E. Clavice, M. Gastaud, H. Brunet. Amplifying medium behaviour of an A. C. excited high power  $\text{CO}_2$  laser. *SPIE*, 1992, 1810: 117~120
- 5 麻毓璜, 贾永昌, 刘维祥 译. 热喷涂原理与应用技术, 成都: 四川科学技术出版社, 1987
- 6 高荣发编著. 热喷涂. 北京: 化学工业出版社, 1991

## Arc Sprayed Helical Electrodes Resonant Silent Discharge $\text{CO}_2$ Laser

Fu I. Yung Yen Weichung Liu Haipei

(*Institute of Optical Science, Center University, Taiwan*)

Lih Weicheng

(*Materials Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute*)

**Abstract** A type of fast axial flow  $\text{CO}_2$  laser based upon resonant silent discharge has been developed successfully. Its electrodes were arc sprayed on the surface of fused silica discharge tubes, and the discharge was sustained by a resonant inverter tuned at about 100 kHz. The sprayed electrodes proved excellent adhesion, and the helical ones offered very good discharge uniformity. When operated at 5 kPa gas pressured and  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 17 : 2$  mixing ratio, the output of this laser was 225 W with 8% wall plug efficiency. The very high and low contents of  $\text{N}_2$  and He in the mixed gas made this laser different from others.

**Key words**  $\text{CO}_2$  laser, resonant silent discharge, arc sprayed electrodes