

## 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器评述

左都罗 李适民

(华中理工大学激光技术与工程研究院,武汉,430074)

**摘要:** 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器是最重要的工业激光器之一。作者对它的发展状况及关键技术,如气流方式、放电结构和谐振腔稳定性等进行了评述,希望能对国内快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的发展提供帮助。

**关键词:** 快轴流 气体放电 谐振腔

### Review of fast axial flow CO<sub>2</sub> laser

Zuo Duluo, Li Shimin

(Institute of Laser Technology and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Fast axial flow CO<sub>2</sub> laser is one of the most important industrial lasers. Its developing state and related key technologies such as gas flowing pattern, discharging electrode structure and resonator stability are reviewed in the paper. It is hoped to be helpful for the development of fast axial flow CO<sub>2</sub> laser in the country.

**Key words:** fast axial flow gas discharge resonator

和(9)式在  $I_s = 0$  时数值计算结果。曲线 4 是大调制度中间段理论,由(8)式和(9)式在  $I_s = 10$  时数值计算结果。

#### 4 结 论

理论分析表明,热激发和非线性调制度对双光束耦合强度特性影响甚大,希望引起注意。

#### 参 考 文 献

- 1 Klein M B, Vally G. J A P, 1985;57:4901
- 2 Ducharms S, Feinberg J. J O S A, 1986;B3:283
- 3 Ja Y H. Opt & Quant Electron, 1985;17:291
- 4 王 韧,莫 党. 中山大学学报(自然科学版),1992;31(1):50
- 5 余卫龙,何穗荣,汪河洲 *et al.* 物理学报,1995;44(1):87~91
- 6 朱瑞德,王 韧,谭建华 *et al.* 物理学报,1992;41(9):1445
- 7 吉选芒,安毓英,刘劲松. 西安电子科技大学学报,1998;25(1):72
- 8 Kwak Ch H, Park S Y, Lee E H. Opt Commun, 1995;115:315
- 9 Kukhtarev N V, Markov V B, Odulov S G *et al.* Ferroelectrics, 1979;22:949

作者简介:王金来,男,1957年4月出生。副教授。现从事光折变非线性光学的研究工作。

## 引 言

快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器得名于它的与光束同轴的快速流动气体冷却技术。由于光束质量好、功率高、运行稳定可靠,是一种主要的工业激光器,在激光切割、焊接、打孔及轧辊激光刻花等对光束质量要求较高的场合得到了广泛的应用。我们对快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的状况及其中的关键技术进行了评述,希望对我国快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的发展能有所帮助。

### 1 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的发展状况

快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器诞生于 70 年代初<sup>[1]</sup>。快轴流技术的引入,大幅度提高了单位体积的注入功率,并保证了激活介质良好的均匀性和对称性。由于它具有优良的光束质量,能长时间稳定可靠运行,迅速成为工业激光器的主流之一。

国外的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,商业产品最大功率达 20kW<sup>[2,3]</sup>。德国 Fraunhofer 激光技术研究所和 Trumpf 公司合作,在 90 年代中期启动了 40kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的研究计划<sup>[4]</sup>。最近, Hertzler 等人<sup>[5]</sup>, Habich 等人<sup>[6]</sup>报道了该计划的研究结果,最大输出功率已达 30kW。用这种激光器进行厚钢板焊接,熔深可达 20mm。激光器的光束质量,一般 3kW 以下的激光器模式以 TEM<sub>00</sub> 或 TEM<sub>01</sub> 模为主 ( $M^2 < 2$ ),主要应用于激光切割,3kW 以上的模式为低阶模 ( $2 < M^2 < 3$ ),主要应用于激光焊接。

国内 80 年代开始快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的研究,华中理工大学、南京 772 厂、长春光机所、等离子体物理所等单位都先后进行过这方面的工作。华中理工大学承担七五攻关项目,研制成功了使用罗茨风机、直流激励的 1500W 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器;通过八五攻关项目大型轧辊激光刻花加工装备,把 1500W 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器技术产品化,应用在武汉钢铁公司轧辊激光刻花生产线上<sup>[7]</sup>。南京 772 厂合资建立了东方激光公司,现主要进行德国 Rofin-Sinar 公司快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的大件组装<sup>[8]</sup>。长春光机所马云程等人报道了使用涡轮风机、直流激励的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[9]</sup>,最大输出功率为 1100W。等离子体物理所陈声鸿等人报道了使用罗茨风机、射频激励的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[10]</sup>,最大输出功率为 1kW 左右。国产激光器的水平,与国际水平相比,在注入功率、输出功率,特别是长期运行的稳定可靠性等方面还存在较大差距。虽然扩散冷却板条 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[11]</sup>有可能替代快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器成为工业激光器的主流,但该激光器结构复杂,输出光束须整形才能满足应用需要,且高功率(如 5kW 以上)的板条激光器技术难度很大<sup>[12]</sup>,故快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器还有不可取代的地位,尽快提高快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的水平是国内工业 CO<sub>2</sub> 激光器发展的当务之急。

### 2 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的关键技术

图 1 给出快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的方框图。快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器由谐振腔、放电管、热交换器、风机、气源、真空泵、电源和控制等几部分组成。影

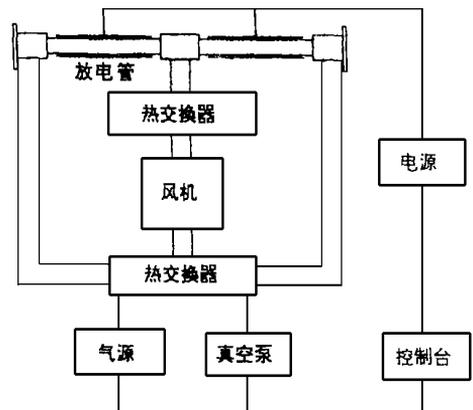


图 1 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器方块图

响激光器工作性能的关键因素是气流方式、放电结构、谐振腔的稳定性,下面进行详细的评述。

## 2.1 气流方式

快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器是温度效应控制的激光器,工作气体的温度存在一临界值,温度高于临界值,激光介质不存在粒子数反转,无激光辐射输出。温度低于临界温度,提高注入功率就有可能提高输出功率。注入功率的上限受流动气体带走热量能力的限制。因此,最大注入功率  $P_{el}$  和允许的最大温升  $T$  之间应满足右式<sup>[5,13,14,15]</sup>:  $P_{el} = (1 - \eta)^{-1} \cdot m \cdot C_p \cdot T$  (1) 式中,  $\eta$  为电光转换效率,  $m$  为工作气体质量流量,  $C_p$  是工作气体比热。最大注入功率  $P_{el}$  与气体质量流量  $m$  成正比。虽然这一公式是在研究射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器时提出的,它对直流激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器同样成立。Lander 等人<sup>[16]</sup>报道的开放式结构气体快速流动放电激励的同轴激光系统可看作快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器的一个特例。该激光系统采用直流激励,两个放电管串联,获得了 135kW,时间 80s 的高功率输出。这说明激光器的注入功率(或输出功率)不取决于放电管的多少,或放电长度,而取决于流过放电管的气体流量。

气体质量流量的提高取决于两个方面:风机的泵速(一般指泵入口处的体积流量)和风机入口处气压(略低于放电管气压)。对同一风机而言,只有尽量减小外部气流管道阻力,降低对风机压缩比的要求,才有可能减少气体回流,提高泵速和风机入口处的气压。外部气流管道的阻力取决于放电激励方式及电极的结构,在下一节将作详细介绍。早期的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,如法国 Gastaud 等人报道的 10kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[17]</sup>,放电管气压为 6665Pa,Coherent 公司的 EFA-51 激光器,泵入口气压为 7998Pa。现在的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,一般放电管气压在 10664Pa 左右,如 Rofin-Sinar 公司的 SM 系列激光器,风机入口气压将近 10kPa(约 76Torr)<sup>[18]</sup>;PRC 公司的激光器,放电管内气压更高达 11997Pa 以上<sup>[19]</sup>。放电管内气压或风机入口气压提高了,即使是同样的泵速,质量流量也明显不同。由于管道阻力减少,一般换用大流量泵速的涡轮泵,更使质量流量显著上升。

使用涡轮风机,另一个重要的优点,就是减少油污染,提高了放电稳定性和镜片、放电管的使用寿命。PRC 公司自行研制的受专利保护的涡轮风机<sup>[20]</sup>,泵腔和轴承之间的密封采用固态密封,基本上实现了无油污染,使镜片的使用寿命达 12000h 以上<sup>[19]</sup>。Reybold<sup>[21]</sup>,Becker<sup>[22]</sup> 等公司专为快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器研制的罗茨泵,也把无油污染当作一个重要特点。

## 2.2 激励方式及放电结构

如上所述,激励方式及放电结构对气流阻力有很大影响。快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器可以采用直流、射频及微波等多种激励方式。最常见的激励方式为直流激励和射频激励。直流激励方式一般用于 6kW 以下的快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器(但 Gastaud 等人报道的 10kW 激光器<sup>[17]</sup>为直流激励),射频激励方式一般用于 6kW 以上的激光器(但 Trumpf 公司的 TLF 系列激光器<sup>[3]</sup>,自 0.7kW 至 20kW,全部采用射频激励)。

射频激励电子特点:(1)电极位于放电管外,是电容耦合的横向放电(放电方向垂直于光束方向);(2)电极形状要求严格,以提高放电的对称性;(3)起辉电压低;(4)放电均匀稳定,无可见的放电辉光抖动;(5)易于调制,调制脉冲频率可达 100kHz;(6)电源复杂,易产生辐射污染,电源及放电管须进行屏蔽。

直流激励电子特点:(1)电极位于放电管内,放电方向与光束方向一致;(2)可以有多种电极结构;(3)起辉电压高,一般要使用触发电极;(4)易产生放电不稳定性:要求在阳极形成湍

流;(5)不易调制:工频直流电源,调制频率一般最大为 2kHz,开关电源,调制频率一般最大为 5kHz;(6)电源简单,无辐射污染。

射频激励电极位于放电管外,对工作气体湍流没有严格要求(若采用螺旋电极,放电气体不需要旋转;若采用圆柱面电极,放电气体需要旋转,使增益区均匀。Pfeiffer 等人认为<sup>[14]</sup>,前一方案更好一些),因此,放电管气流阻力小,有利于流过大流量,获得高功率输出。Fraunhofer 激光技术研究所 Habich 等人报道的 25kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[6]</sup>,仅用了两台 3500m<sup>3</sup>/h 的涡轮泵。如果是直流激励,一台 3500m<sup>3</sup>/h 左右流速的泵,最大输出功率只有 4kW 左右。

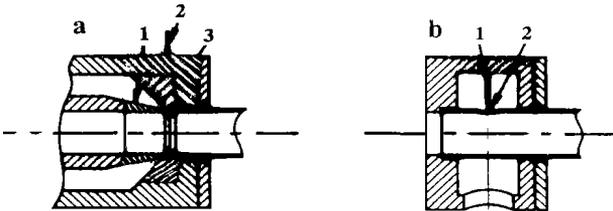


图 2 两种典型的阳极结构

直流激励的激光器,要求在阳极附近产生较强的湍流。在直流激励快轴流 CO<sub>2</sub> 的发展中,出现过多种不同的阳极结构。图 2 给出了两种典型的阳极结构。图 2a 是 Amada 公司 Koseid 等人在他们的专利中报道的阳极结构示意图<sup>[23]</sup>。阳极为多个分别镇流的针(镇流电阻没有画出),湍流发生机构为绝缘材料(如陶瓷)制成的圆锥形涡轮状湍流发生器。Coherent 公司早期的 EFA 型快轴流激光器阳极结构与此类似,只是其中的涡轮状湍流发生器改成了无氧铜阳极,湍流发生机构为阳极和陶瓷管之间的可调气隙。近期流行的阳极结构为圆孔喷嘴针状阳极,如图 2b 所示。Coherent 公司的 Smith 等人<sup>[24]</sup>,Rofir Sinar 公司的 Schanz 等人<sup>[25]</sup>在他们的专利中都报道了类似于这种形式的阳极结构。图 2b 所示的阳极结构与图 2a 的相比,(1)阳极面积减少,仅需要在在一个针尖附近产生强湍流,要求产生湍流的面积比环状阳极小;(2)气流阻力小,同样的截面积,孔状通道的阻力比环状通道的阻力要小得多。直流激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器风机的主流由高压压缩比的罗茨风机换成低压压缩比的涡轮风机,与使用针状阳极、圆孔喷嘴,减少了气流阻力是分不开的。

### 2.3 谐振腔

有了好的气流方式和放电结构,能否输出激光辐射,激光辐射的稳定性如何,决定于谐振腔的稳定性。谐振腔由光学镜片(包括输出窗、后反射镜及转折镜等)和光桥(用于支撑光学镜片和放电管)组成。它们的布置方式有直线(单折腔)、U 形(双折腔)、三角形、四边形等多种形式。图 3 给出了一种单折谐振腔的示意图。除应该使用高质量的镜片外,最关键的一个因素,是光桥的稳定性。

使光桥不稳定的关键是由于温度变化产生不均匀的热形变。激光器工作时,放电管对周围环境产生热辐射,使环境温度升高。这种温升是不均匀的,进气座附近温度低,回气座附近温度高。激光器是否放电及注入功率高低变化,都有可能影响工作气体的温度。工作气体温度的变化,也会使气体流经的管道产生热形变。

国外激光器有两种使光桥保持稳定的方法:一个谐振腔端板(其上固定有谐振腔镜片)固定,另一个可以自由伸缩,它们之间由工作气体流入管道(图 3 中的谐振腔基座和储气筒)连

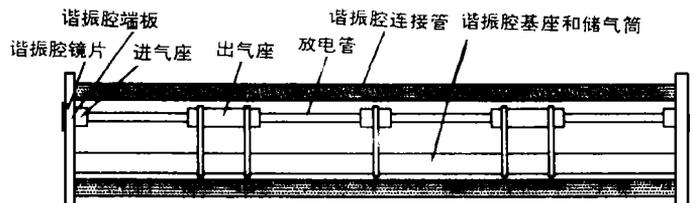


图 3 单折谐振腔的示意图

接,控制前后端板的相对尺寸。用流入工作气体的温度控制风机出口处热交换器冷水的流量,使流入工作气体温度恒定,尽量减少工作气体流入管道尺寸的温度变化。Coherent 公司的 Smith 等人<sup>[24]</sup>,Matsushita 公司的 Tsutomu 等人<sup>[26]</sup>的专利都报道了这种方案。另一种方案,前后支架用殷钢棒(图 3 中的部件谐振腔基座和储气筒)或水冷(殷)钢管(图 3 中的部件谐振腔连接管)连接,组成刚性光桥,并采用可浮动的悬挂固定,完全隔离工作气体温度变化引起的管道伸缩对光桥的影响。Rofin-Sinar 公司的 SM 系列快轴流激光器<sup>[2]</sup>及 PRC 公司的激光器<sup>[19]</sup>都采用了这种结构。前者的刚性光桥由 4 支水冷(殷)钢管固定。后者采用中心殷钢棒,周围 3 支 Lightvar 棒的方法,光桥没有采用水冷结构。采用了谐振腔稳定措施后,激光输出功率的不稳定性小于  $\pm 2\%$ ,PRC 公司更声称他们的产品功率不稳定性在  $\pm 0.5\%$  以内。

### 3 总 结

气流方式、放电结构及谐振腔稳定性是影响快轴流  $\text{CO}_2$  激光器性能的关键因素。激光器注入功率的大小取决于工作气体的质量流量。射频激励快轴流  $\text{CO}_2$  激光器,对湍流没有严格要求,气流阻力小,注入功率可远大于直流激励  $\text{CO}_2$  激光器。直流激励快轴流  $\text{CO}_2$  激光器,采用环状喷嘴和针式阳极结构,使气流阻力显著减小,提高了放电气体气压,即提高了注入功率。通过稳定流入气体的温度或使用刚性管固定谐振腔端板的相对位置,并对整个光桥采用可浮动的固定方式,保证了谐振腔的热稳定性。妥善解决了气流方式、放电结构及谐振腔稳定性等三个关键问题,即保证了快轴流  $\text{CO}_2$  激光器作为工业激光器的高效率、优良光束质量和长期稳定性等优良特性。

### 参 考 文 献

- 1 Gainsworths R K, Mathias L E S, Carmichael C H H. A P L, 1971; 19: 506
- 2 Rath W, Northeman T. SPIE, 1994; 2206: 185 ~ 193
- 3 Pfeffer W, Breining K, Paul R *et al.* SPIE, 1994; 2206: 80 ~ 90
- 4 Habich U, Du K, Ehrlichman D *et al.* SPIE, 1994; 2502: 20 ~ 24
- 5 Hertzler C, Wollermann Windgasse R. SPIE, 1996; 2788: 14 ~ 23
- 6 Habich U, Jarosch U, Maly H *et al.* SPIE, 1997; 3092: 174 ~ 177
- 7 邓鸿林. 激光与红外, 1996; 26(3): 191 ~ 192
- 8 马云程, 公治中, 谢冀江. 激光与红外, 1995; 25(6): 31 ~ 35
- 9 陈声鸿. 应用激光, 1997; 17(5): 218 ~ 220
- 10 Hall D R, Baker H J. SPIE, 1995; 2502: 12 ~ 19
- 11 Nowack R, Bochum H, Hall Th *et al.* SPIE, 1997; 3092: 88 ~ 91
- 12 Hertzler C, Wollermann Windgasse R. SPIE, 1994; 2206: 176 ~ 184
- 13 Jarosch U, Niehoff J, Loosen P *et al.* SPIE, 1994; 2206: 194 ~ 204
- 14 Lander M L, Maxwell K J, Reilly J P *et al.* SPIE, 1997; 3092: 186 ~ 189
- 15 Gastaud M, Clavier E, Chauvet P. SPIE, 1992; 1810: 121 ~ 124
- 16 Nilsen C J, Weiss H P. US P, No. US4923364, 1990
- 17 Koseid R. US P, No. US4993037, 1991
- 18 Smith D E, Sasett M W. US P, No. US4799231, 1989
- 19 Schanz K, Wurst W. US P, No. US5212708, 1993
- 20 Tsutomu S, Doukei C. US P, No. US5426659, 1995

作者简介:左都罗,男,1966年3月出生。副教授。现从事高功率气体激光器及激光加工的研究工作。