

管板式横流 10 kW CO₂ 激光器的实验研究

查鸿逵 陆鸿飞 陈平 唐士清 张寿祥
杨逸根 魏在福 江森 赵东焕 王润文
(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文叙述一台具有重复脉冲辅助放电的横向流动连续 CO₂ 激光器。实验研究了放电特性, 并给出激光器增益和输出功率的实验和计算结果。激光器最大输出功率 12600 W。在输出功率 10200 W 条件下一次充气连续运行超过 8h, 功率不稳定性 $\pm 1.5\%$ 。

关键词: 横向放电型 CO₂ 激光器

Experimental investigation on a 10kW transversal flow discharge CO₂ laser with tube-plate electrodes

*Cha Hongkui, Lu Hongfei, Chen Ping, Tang Shiqing, Zhang Shouxiang
Yang Yigen, Wei Zaifu, Jiang Miao, Zhao Donghuan, Wang Runwen
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)*

Abstract: A transversal flow CW CO₂ laser with pulsed auxiliary discharge was developed. The discharge characteristics was investigated experimentally. The results of gain coefficient and output power is presented both numerically and experimentally. The maximum output power of 12600 W has been obtained. Sealed-off CW operation for more than 8hrs can be obtained for each gas refilling with of output power 10200 W and power unstability of $\pm 1.5\%$.

Key words: transversal flow discharge CO₂ laser

一、引言

高功率横流 CO₂ 激光器已广泛应用于工业生产的金属材料热处理、焊接、切割、合金熔覆等激光加工领域。由于管板式电极结构的简单、实用, 管板式横流 CO₂ 激光器已经实用化成为产品^[1]。近年来管板式横流 CO₂ 激光器已从千瓦级发展到五千瓦级^[2~4]。作者用扩大管板式电极放电区体积并采用某些辅助放电措施以实现大体积高压稳定放电, 获得 12600 W 的激光输出。本文介绍这台万瓦级 CO₂ 激光器的结构特点, 并给出放电特性、小信号增益分布和输出功率等实验结果。

二、激光装置

2.1 总体结构

万瓦级 CO₂ 激光器是一台横向流动闭合循环装置。总体结构设计采用单机结构的整体方案(见图 1)。为了简化加工工艺在保证密封性能的前提下,降低制造成本采用回流风道和真空箱功能分开的结构。激光器总体尺寸为 2m×2m×2.5m。

2.2 放电区

激光器放电区的放电电流、气流和光轴互相垂直。整个放电区由两个放电通道组成见图 2。每个放电通道的主放电电极是由相距 7 cm 的两排阳极块和置于放电通道中间,直径为 0.8 cm 的水冷铜阴极管组成。每个阳极块分别用镇流电阻与直流电源正端相连。直流电源的负端和阴极管接地,形成直流主放电回路。在每块阳极和阴极管之间都有针状的辅助电极,辅助电极和阳极块相距 1.5 cm。每根辅助电极针分别通过电容与重复频率 5 kHz 的脉冲电源高压端相连。脉冲电源的低压端则分别用电容与阳极和阴极相连,形成脉冲辅助放电回路。每个放电通道沿光轴方向的放电长度为 150 cm,总放电体积为 10000 cm³。

工作气体的激发是用直流辉光放电为主加脉冲辅助放电的联合放电。放电性质仍属自持

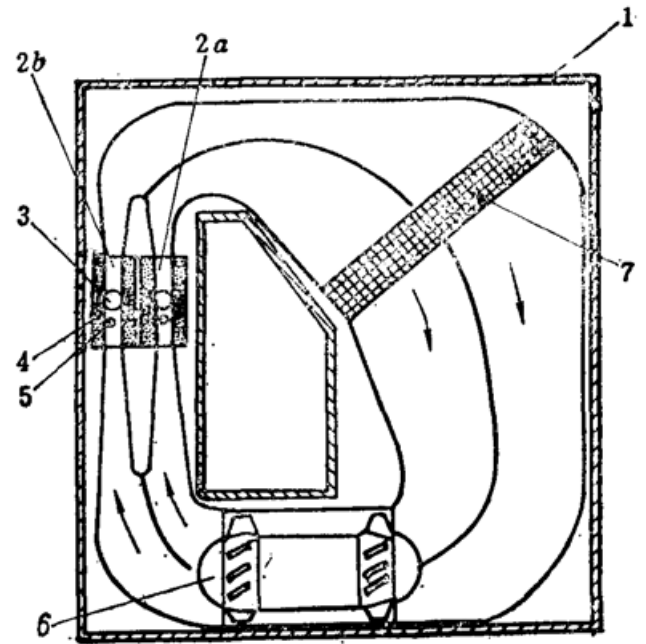


Fig. 1 Schematic of the 10 kW CO₂ laser
1—Chamber; 2a, 2b—Inside and outside discharge channel; 3—Optic cavity; 4—Anode; 5—Cathode; 6—Blowers; 7—Heat exchanger

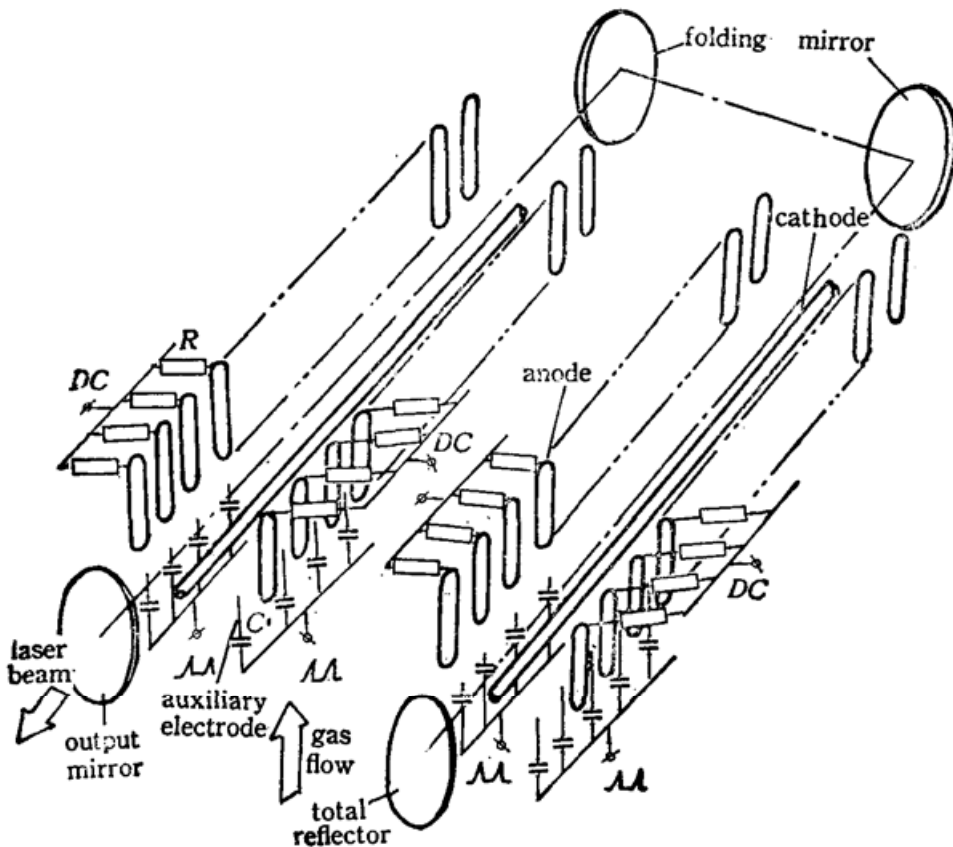


Fig. 2 Schematic diagram of the discharge region and optic cavity

放电,加辅助放电目的改善放电稳定性并增大放电工作气压。试验表明工作气压可以从单纯直流放电的最高气压 6.7 kPa 增大到 10.6 kPa,获得最大放电注入功率 84 kW,比没有辅助放电时增加到 1.5 倍。

2.3 气动系统

激光器气体流动系统是用两台并联运行的轴流风机驱动气体流经放电区,每台风机流量为 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 。为了尽可能地降低风机噪音,设计风机转速 3000 r/min,可以方便地用 50 Hz 工频供电驱动,使整个激光器系统噪音控制在 76 dB 以下。为了克服内外两个放电通道的流速不均匀,分别在两个放电通道的入口安装不同阻尼系数的网格,对风机进入两个放电通道的气流加以整流。用皮托管测试经阻尼网格整流之后的放电区气体流速 50 m/s,速度不均匀度小于 10%。经放电区放电加热后的气体通过一台换热量为 70000 J/s 的板翅式热交换器冷却后回到轴流风机的入口,以便把气体连续输送到放电区。

2.4 光谐振腔

由于是双放电通道,所以光腔采用 π 型折叠式稳定谐振腔,见图 2 中光腔配置示意图。腔长 4 m,全反射镜是曲率半径为 15 m 的水冷铜反射镜。折叠反射镜用两块互成 90° 的水冷平面铜反射镜。用平面硒化锌或砷化镓作输出耦合镜。四块镜子分别用光桥稳定地连接起来。输出镜的透过率有 50%、60%、70% 三种。为了长时间稳定连续运转,特别加强输出镜的强迫冷却,采用三套冷却系统即输出镜片边缘的水冷系统,输出镜内表面(增反膜)的气冷系统和输出镜外表面(增透膜)的风冷系统。结果激光器获得最高输出功率为 12600 W,效率 17.3%。激光器在密封条件下,一次充气长时间稳定输出功率为 10200 W,电光转换效率 14.3%。连续运转时间大于 8h,功率不稳定度 $\pm 1.5\%$ 。

为了提高光束的质量,设计了光腔 g 因子参量 $g_1g_2 \approx 0.9$ 左右的光腔结构,并且用水冷光阑进行选模,得到 6 kW 的 TEM_{10} 为主的低阶模,光束发散角为 2.2 mrad,电光转换效率为 8%,功率不稳定度为 $\pm 2.3\%$ 。

三、实验结果

3.1 放电特性实验结果

经扩大放电体积后的管板式电极系统要解决大体积放电的均匀性,尤其期望高气压稳定放电。采用某种辅助放电是必要的。

第一种实验是不采用任何辅助放电,如图 3 的曲线 1,它不能获得高气压稳定放电,放电均匀性是几种类型放电中最差的一种。第二种实验是采用直流辅助放电,只需通过限流电阻在针状辅助电极与阴极管之间加上一恒定的直流高压电源,使辅助辉光放电产生的电子依靠气体吹向下流的放电区。本实验所加直流辅助放电功率是 300 W。如图 3 中曲线 2。放电仍不太均匀。第三种实验是采用交流辅助放电,即在辅助电极与阴极管之间用一系列频率为 1 MHz 的高频正弦波交变电源代替直流辅助放电中的直流高压电源。由于高频对器件的屏蔽技术困难限制平均功率只有 260 W,因此与用直流辅助放电相比改善不很明显。如图 3 中曲线 3 放电较均匀。第四种实验是采用重复脉冲辅助放电,实验装置和方案如前面第二节及图 2 所述。重复脉冲频率 5 kHz、脉宽 $0.1\ \mu\text{s}$ 。平均功率 700 W。图 3 中的曲线 4、5 就是采用这种

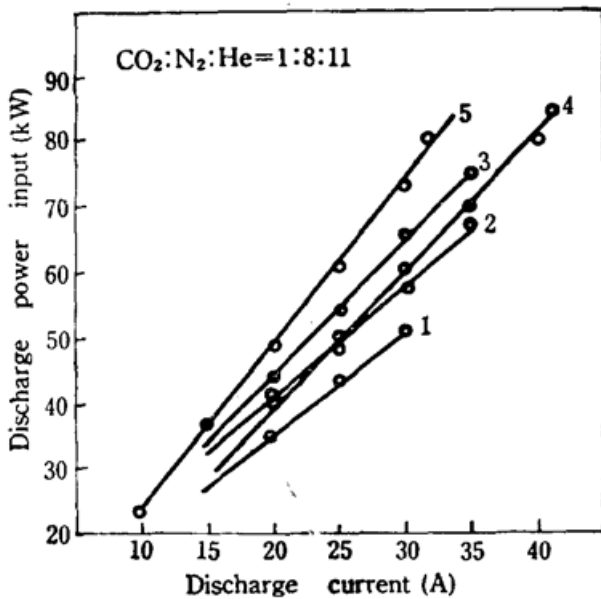


Fig. 3 Discharge power input versus current for different auxiliary discharges

1—Without auxiliary discharge, $P=6$ kPa; 2—With D. C. auxiliary discharge, $P=8.7$ kPa; 3—With 1 MHz A. C. auxiliary discharge, $P=8.7$ kPa; 4—With 5 kHz periodic pulse auxiliary discharge, $P=8.7$ kPa; 5—With 5 kHz periodic pulse auxiliary discharge, $P=10.7$ kPa

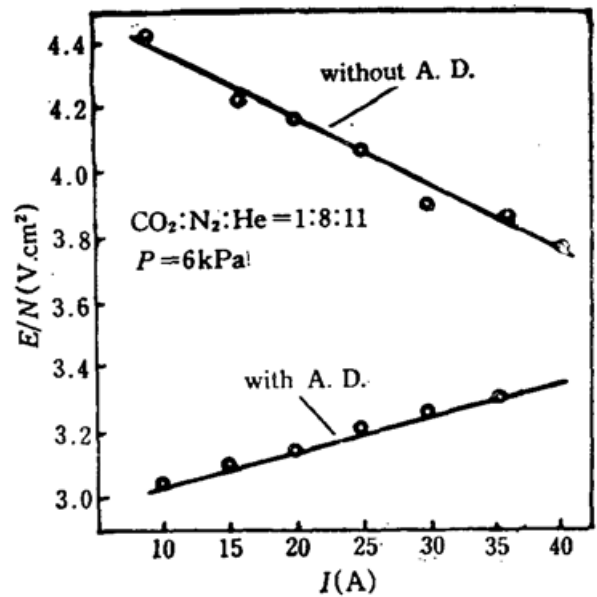


Fig. 4 The value of E/N vs current of the main discharge with and without auxiliary discharge

辅助放电时的主放电特性。用这种辅助放电可获得最高气压是 10.7 kPa, 无弧放电最大注入功率 84 kW, 放电很均匀。显然, 在现实条件下选取这种方案是可取的。

图 4 表示在相同的气体比 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:8:11$ 和相同的气压 $P=6$ kPa 条件下, 用和不用脉冲辅助放电时的电流与电场强度关系。实验结果说明, 不用辅助放电的电场强度与粒子数之比值 E/N 值较高 ($E/N \approx 4 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$), 并随主放电电流的增加而降低, 放电呈负阻特性。当用 5 kHz 的脉冲辅助放电时则主放电的 E/N 值较低 ($E/N \approx 3 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$), 并随主放电电流的增加而稍有增加。可见脉冲辅助放电具有某些预电离的作用。但是 E/N 值还比非自持放电的最佳 E/N 值 $2 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ 要大。而且 E/N 值随主放电电流增加的量也不大, 正阻特性还不十分明显, 仍属自持放电的特性。然而本实验所用脉冲放电功率只占总注入功率的 0.8%, 远小于一般文献给出的非自持放电所需脉冲功率占总注入功率 5% 的要求^[5,6], 就已经使脉冲放电的预电离作用获得放电的最大注入功率增加到 1.5 倍。

3.2 小信号增益测量结果

图 5 中标出小信号增益沿流向的分布实测值, 条件是工作气体比 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:8:11$, 放电电流 $I=30$ A, 气压 P 分别为 10 kPa、8 kPa 和 6 kPa。图中还画出用五温度模型^[7]数值计算所得的曲线, 其数据与实验值接近。小信号增益随气压 P 的增加而减小, 小信号增益沿流向开始很快增到最高点, 然后下降。但在下游位置实测值下降比计算值下降快, 这是由于实测下游位置的气体温度 341K 比理论计算所得的温度值 330K 偏高。图 6 是小信号增益沿电场方向分布的实测值, 实验条件同图 5。增益值在阴阳极之间的区域较大, 在阴极的下游区域最小。而且气压愈高这种分布不均匀性愈大。图 7 是放电区一个特定点的小信号增益, 随放电电流增加而增加的程度实测值。实验条件气体比与图 5、图 6 相同, 气压 $P=6$ kPa。图中画出的理论计算曲线, 基本和实验数值一致。

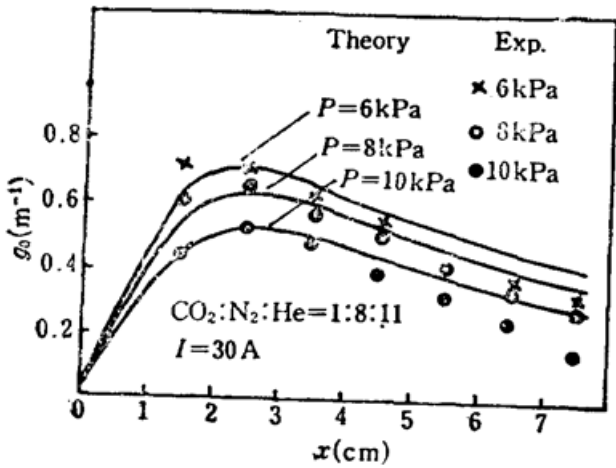


Fig. 5 Computed and measured distribution of the small signal gain along the gas flow

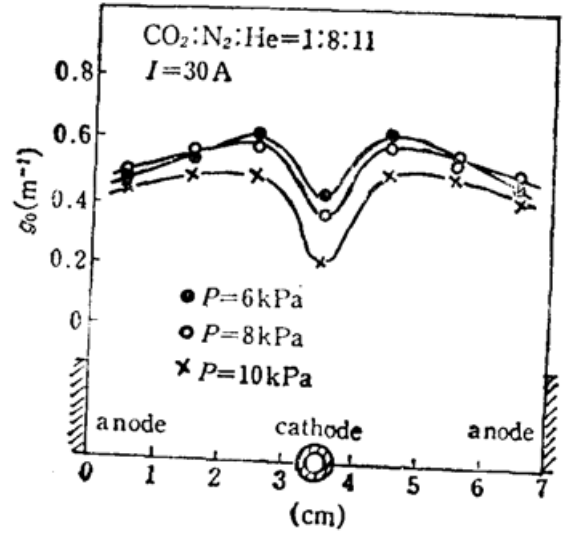


Fig. 6 Distribution of the small signal gain along the electric field

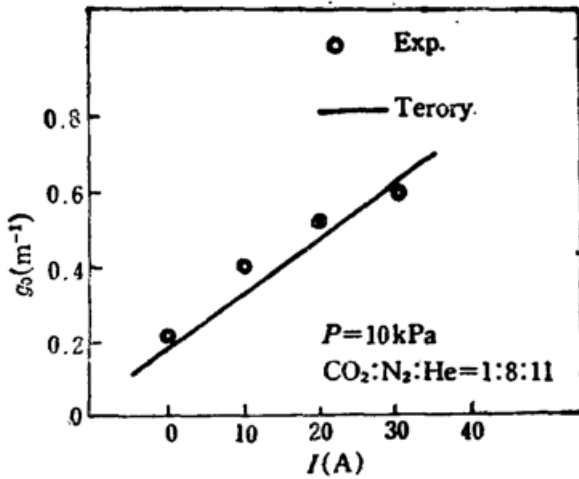


Fig. 7 Computed and measured variation of small signal gain with current

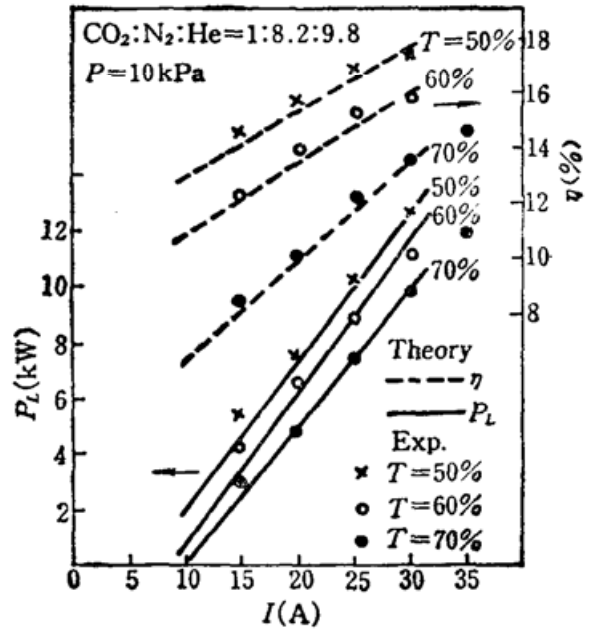


Fig. 8 Computed and measured evolution of output power and efficiency with current

3.3 激光输出功率实验结果

用第二节和图 2 所述的装置和光腔参数, 进行多模、低阶模的功率输出和长时间连续运转实验。输出功率用 JG XK-80 型激光功率控制显示仪测量。

(1) 多模输出功率: 图 8 是多模输出功率 P_L 、效率 η 与放电电流关系的实测值。图中还画出用类似文献 [7], [8] 处理方法数值计算所得曲线。图 9 是多模输出功率和效率随输出镜透过率变化的实测值和计算曲线。图 10 是用三种不同输出镜透过率, 多模输出功率随气压 P 的计算曲线和实测值。实验和计算表明随着放电电流的增加, 输出功率和效率线性增加, 并未达到饱和。但受输出窗口强度的限制, 实测最大输出功率不超过 12600 W。还看到, 工作气压增加输出功率也增加, 输出镜透过率减小, 输出功率和电光转换效率增加。

(2) 低阶模输出功率: 取光腔 g 因子参数 $g_1 g_2 \approx 0.9$, 输出透过率 $T=70\%$ 并用水冷光

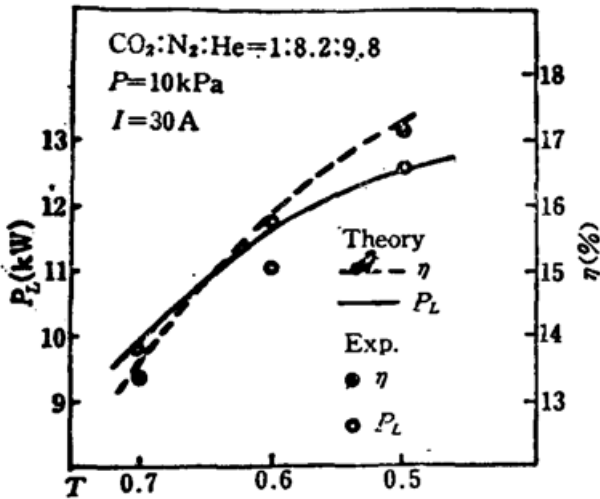


Fig 9 Computed and measured evolution of output power and efficiency with the transmissivity of output window

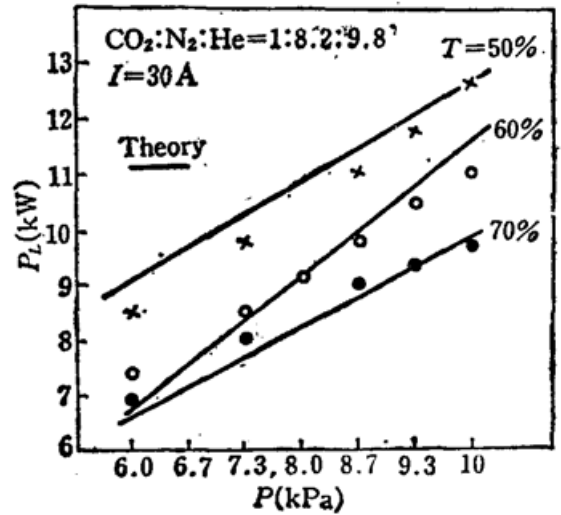


Fig. 10 Computed and measured evolution of output power with gas pressure

Experiment: x—T=50%, o—T=60%, ●—T=70%

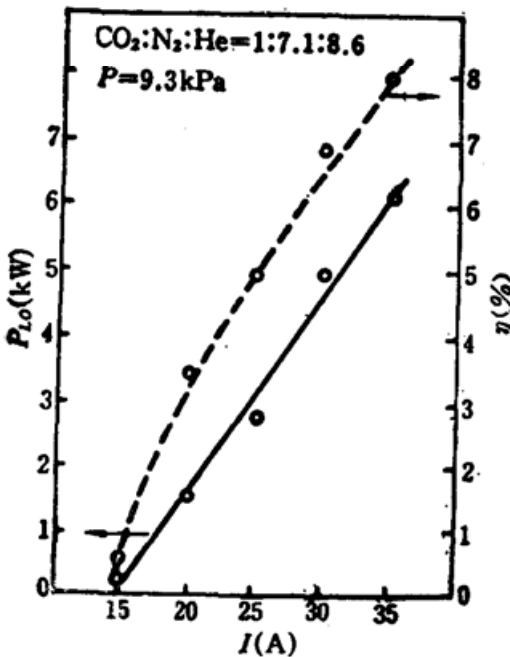


Fig. 11 The lower order mode output power and efficiency vs current

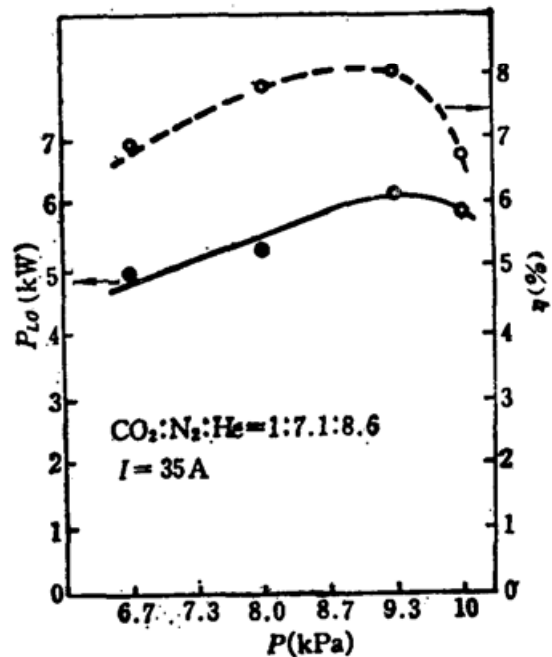


Fig. 12 The lower order mode output power and efficiency vs gas pressure

阑选模获得低阶模的输出功率 P_{L0} 及其效率与放电电流的关系如图 11。在 $I=35\text{ A}$ ，气压 $P=9.3\text{ kPa}$ 时，获得输出功率 6150 W 的 TEM_{10} 模为主的低阶模，其效率 $\eta=8\%$ 。图 12 表示与图 11 相同的光腔参数和气体比分条件下，不同气压对低阶模输出功率的影响。输出功率和效率都随气压的增加而增加，当 $P=9.3\text{ kPa}$ 时达到峰值。

(3) 激光器长时间稳定运转输出功率：激光器为满足工厂 8 小时连续运行的需要，进行了在封离工作条件下，一次充气长时间连续工作试验。结果见图 13，连续工作时间大于 8 小时，平均输出功率 10200 W ，平均转换效率 14.3% ，功率不稳定性为 $\pm 1.5\%$ 。实测表明，在 8 个多小时的运行后，放电电压只上升 2.8% ，说明气体成分变化很小，器件密封性能也很好。同样放电区入口气体温度在 8 个多小时运行后只上升 1.5°C ，说明激光器的热交换性能良好。这一切都充分保证了获得长时间稳定运转的好结果。

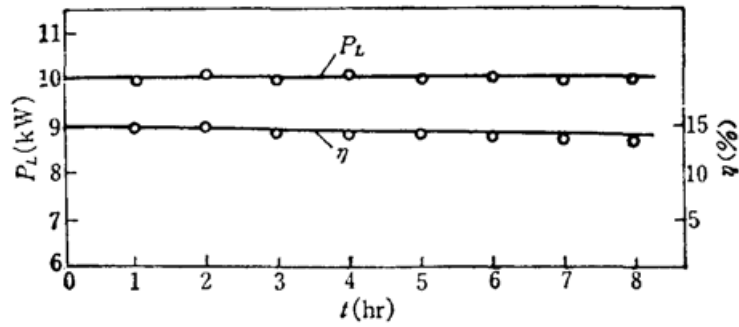


Fig. 13 Measured variation of output power and efficiency with CW operating time

参 考 文 献

- 1 陈可心 *et al.*, 中国激光, **14**(8), 470(1987)
- 2 王哲恩 *et al.*, 中国激光, **10**(8), 551(1983)
- 3 程兆谷 *et al.*, 中国激光, **17**, 激光器件专集(增刊), 19(1990)
- 4 唐士清 *et al.*, 中国激光, **17**, 激光器件专集(增刊), 31(1990)
- 5 V. G. Naumov *et al.*, *Sov. Quant. Electr.*, **7**(11), 1386(1977)
- 6 James P. Reilly, *J. Appl. Phys.*, **43**(8), 3411(1972)
- 7 K. Smith, R. M. Thomson, *Computer Modelling of Gas Lasers*, New York: Plenum, 1978, ch. 2
- 8 T. A. Cool, *J. Appl. Phys.*, **40**(9), 3563(1969)