

无 He 高速流动 CO₂ 激光器的研究

查鸿逵 沈俊泉 程瑞华 杨镜渭 丁克明 奚文龙

(中国科学院上海光机所)

提要: 用一个开环流动装置研究了无 He 混合气的放电 CO₂ 激光输出特性, 获得 1400 W 的输出, 电光效率 ~5%, 并建立了流动条件下的分子动力学模型, 分析计算了小讯号增益、气压、密度、流速、温度等参数沿流场的分布。

Investigation on fast-flow He-free CO₂ laser

Cha Hongkui, Shen Junquan, Cheng Ruihua, Yang Jingwei, Ding Keming, Xi Wenlong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: This paper describes a fast-flow open-cycle CO₂ laser utilizing He-free mixture. The maximum output power was 1400 W, with an electro-optic efficiency of ~5%. A molecular kinetic model under the flow condition was used to calculate the distribution of small-signal gain along the gas flow direction.

横流 CO₂ 放电激光器已经广泛应用在材料加工工业上, 由于工作气体中 He 占 50% 以上, 因此成本甚高。我们这一工作的目的在于研究不使用 He, 而用普通空气或工业纯的 N₂ 气作为工作气体的可能性。我们在无 He 工作气体高速流动放电情况下进行增益分析计算, 即增益随流场的分布以及 CO₂ 比相对增益的影响。同时在一个开环流动的激光装置上进行了放电及激光输出的实验研究。

一、实验装置

装置如图 1 所示。CO₂、空气和 N₂ 混合气流经前室并经多孔板整流后进入放电室。

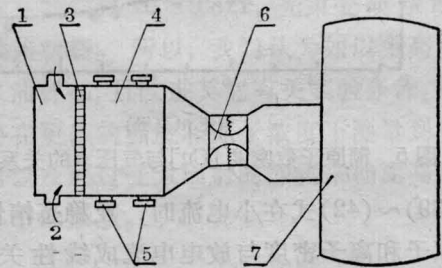


图 1 实验装置示意图

- 1—前室; 2—进气口; 3—多孔板; 4—放电室;
- 5—光腔; 6—可调音速喉道; 7—真空筒

用调节音速喉道的截面来控制流速以及由放电室前的调压阀来控制工作气压。放电后的混合气进入真空筒。流速 0~120 m/s, 气压 0~80 Torr, 流量 0.85~3.4 m³/s, 质量流

收稿日期: 1984 年 1 月 23 日。

量 50~360 g/s 可调, 工作时间 0~5 s。

放电体积为 $280 \times 840 \times 30 \text{ mm}^3$, 阳极是铜平板, 阴极用 221 个 1 mm 厚的刀片由 13 排, 17 行排列组成。在流场上游的相应位置安放由刀片与针构成的预放电电极。每个刀片分别用 $20 \text{ k}\Omega$ 电阻镇流。每排用 100Ω 的可调电阻与电源联接。电极结构如图 2 所示。

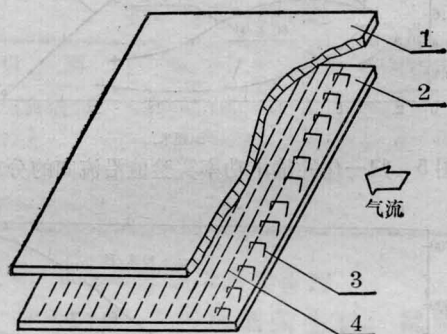


图 2 电极结构

1—阳极板; 2—阴极板; 3—预触发针(34根);
4—阴极刀片(13×17片)

二、计算模型

气体分子在放电区沿着流动方向运动过程中发生分子-电子和分子-分子的碰撞。气体分子在运动中存在激发, 能量转移和弛豫等能量交换过程。因此在放电区内的小讯号增益、气体温度、流速、气压、密度等特性沿流动方向是变化的, 它们同时受分子动力学和气体动力学的规律支配。

为计算小讯号增益、温度、气压流速、密度沿流场的分布, 采用如下的分子动力学模型:

我们用现有的 TEA 激光器放电五温度模型^[1], 利用关系式 $u = \frac{dx}{dt}$ (u 气流速度, x 沿流向的距离, t 时间。) 得到四个描述振动能 E_1 (CO_2 100 模)、 E_2 (CO_2 010 模)、 E_3 (CO_2 001 模) 以及 E_4 ($\text{N}_2 \nu_1$ 模) 的速率方程。

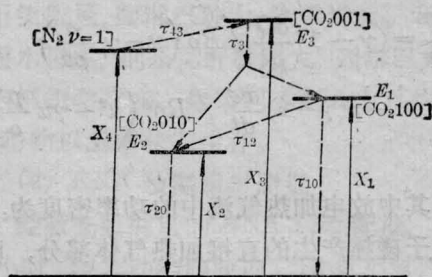


图 3 重要碰撞过程的能级图

$$u \frac{\partial E_1}{\partial x} = \text{Ne} N_{\text{CO}_2} h f_1 X_1 - \frac{E_1 - E_1^e(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1^e(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \left(\frac{h f_1}{h f_2} \right) \left(\frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} \right) + f_1 \Delta N W I_0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial E_3}{\partial x} = \text{Ne} N_{\text{CO}_2} h f_2 X_2 + \frac{E_1 - E_1^e(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} - \frac{E_2 - E_2^e(T)}{\tau_{20}(T)} + \left(\frac{h f_2}{h f_3} \right) \left(\frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial E_3}{\partial x} = \text{Ne} N_{\text{CO}_2} h f_3 X_3 - \frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_4 - E_4^e(T)}{\tau_{43}(T)} - f_3 \Delta N W I_0 \quad (3)$$

$$u \frac{\partial E_4}{\partial x} = \text{Ne} N_{\text{N}_2} h f_4 X_4 - \frac{E_4 - E_4^e(T)}{\tau_{43}(T)} \quad (4)$$

其中流速 u 和温度 T 也是随流场 x 而变化, 可从气体动力学连续方程, 动量方程, 能量方程和状态方程推导出描述 u (流速)、 T (温度)、 p (压力)、 ρ (密度) 的四个方程。这里假设一维, 无粘性及常截面流动。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{dQ}{dt} / (\gamma p - \rho u^2) \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{dQ}{dt} / (u - \gamma p / \rho u) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{dQ}{dt} / (u^3 - \gamma u \frac{p}{\rho}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{dQ}{dt} / R\rho \left(u - \gamma \frac{p}{\rho u} \right) - p(\gamma - 1) \frac{dQ}{dt} / R\rho^2 \left(u^2 - \gamma u \frac{p}{\rho} \right) \quad (8)$$

其中放电加热气流中的功率密度为：由于电子碰撞产生的直接加热气体部分，以及各能级向基态跃迁而能量转移到平动-转动部分之和：

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} = & E_j(x) \\ & - N_e N_{CO_2} h [f_1 X_1 + f_2 X_2 + f_3 X_3] \\ & - N_e N_{N_2} h f_4 X_4 + \left[\frac{E_1 - E_1^e(T)}{\tau_{10}(T)} \right. \\ & + \frac{E_2 - E_2^e(T)}{\tau_{20}(T)} \\ & + \frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} \\ & \left. \times \left(1 - \frac{hf_1}{hf_3} - \frac{hf_2}{hf_3} \right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

小讯号增益：

$$g_0 = f_L \Delta N W \quad (10)$$

我们令激光输出 $I_0 = 0$ 联立解以上 ①~⑩ 方程，就可以求得沿流场 g_0, u, T, p, ρ 的分布。式中其余符号定义见附录。

三、小讯号增益、温度、流速、密度、压力的计算结果

分别在初始流速 u_0 为 120 m/s、90 m/s、60 m/s、40 m/s 条件下用上述模型计算得 g_0, T, u, p, ρ 沿流向的变化。结果如图 4、6、7、8、9 所示。便于比较，我们同样用流速 u_0 为 120 m/s、90 m/s、60 m/s、40 m/s 进行试验，对腔区沿流动方向的输出功率分布

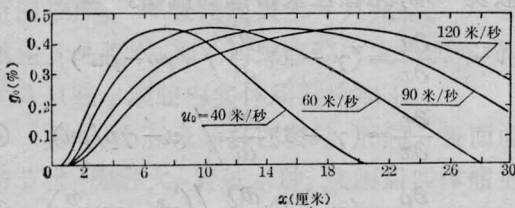


图 4 小讯号增益计算值沿流向的分布

进行测定。方法采用沿流动方向置五对平凹腔，每组腔片均由 $\phi 30, R=1.5$ m 的凹面镜和小孔直径为 $\phi 2$ 的平面输出镜组成，分别测得每组腔片的输出。归一化的试验结果在图 5 中表示。从图 5 中看到流速越高，沿流动方向功率分布区越宽，这和图 4 中所看到的

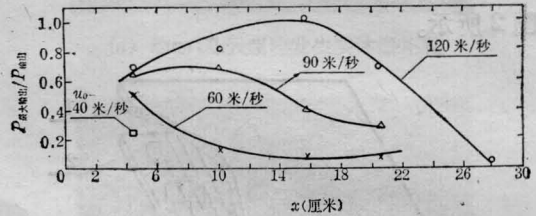


图 5 归一化的输出功率实验值沿流向的分布

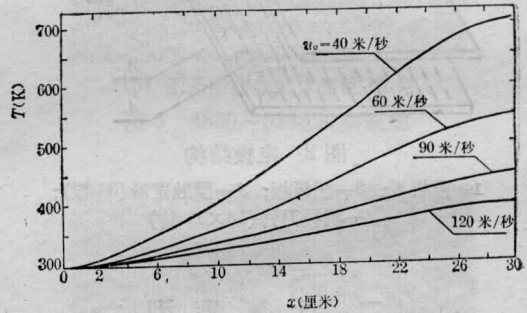


图 6 温度计算值沿流向分布

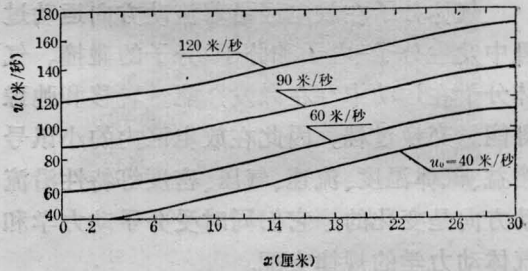


图 7 速度计算值沿流向分布

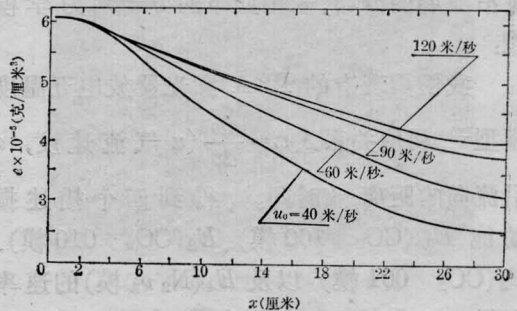


图 8 密度计算值沿流向分布

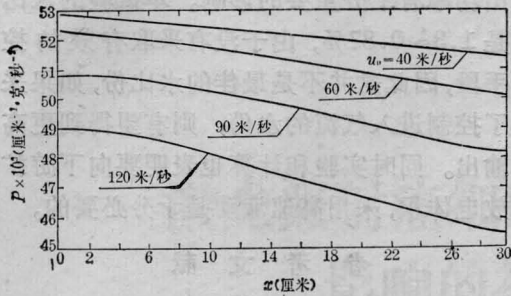


图9 压力计算值沿流向分布

计算的增益也是流速越高，沿流向的增益分布区越宽，两者的趋势是一致的。我们还可以从计算的温度曲线图6看到流速越高温升越小，必然沿流向的增益分布区和功率分布区越宽。

四、输出性能实验

我们用 $\phi 85$ 凹面反射镜， $R=6\text{m}$ ；平面镜小孔为 $\phi 14$ ；工作气体成份 $\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2:\text{Ar}=6\%:2.7\%:90.4\%:0.9\%$ ，气流速度分别在 90m/s 及 120m/s 情况下，用工作气压为 30Torr 、 40Torr 及 50Torr 实验，得到输出功率随放电输入功率的相应关系如图10、图11所示。在流速为 120m/s ，气压为 $30\sim 40\text{Torr}$ 能够获得 1200W 的输出，其电光效率为 4.5% 左右。

腔片改为 $\phi 100$ 的凹面反射镜 $R10\text{m}$ ；

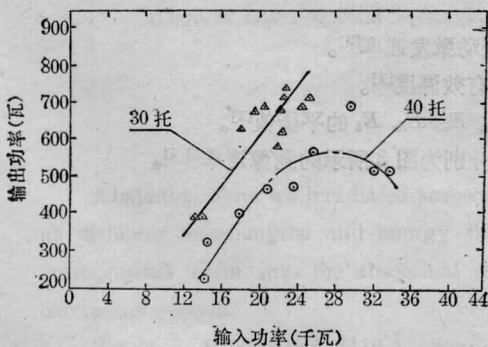


图10 速度为 90m/s 时输出功率随输入功率的变化

$\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2:\text{Ar}=6\%:2.7\%:90.4\%:0.9\%$;

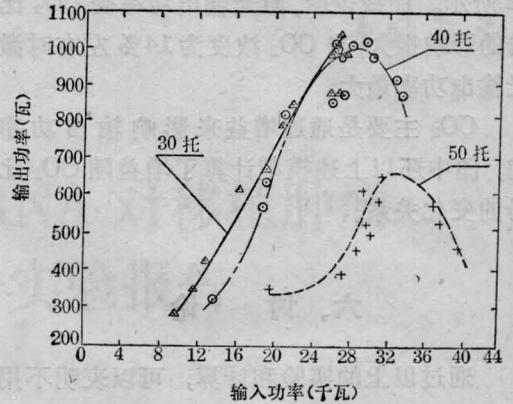


图11 速度为 120m/s 时输出功率随输入功率的变化

$\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2:\text{Ar}=6\%:2.7\%:90.4\%:0.9\%$;

$\phi 100$ 的平面输出镜(输出小孔 $\phi 20$)，用流速 120m/s ，气压 40Torr 时获得本实验最大的激光输出功率 1411W ，电光效率为 4.78% ，相应输出比功率是 6.1J/g ，输入比功率是 128J/g 。

在一定的工作气压，一定的气流速度下，输出功率随输入功率的增加而增加，但达到某一个输出功率的最大值之后则下降，这是由于放电开始不稳定而造成的。

五、 CO_2 比份对输出功率的影响

在流速 120m/s ，气压 40Torr 以及放电电流 14A 等不变的条件下，通过实验得到了激光输出功率与 CO_2 比份的关系曲线如图

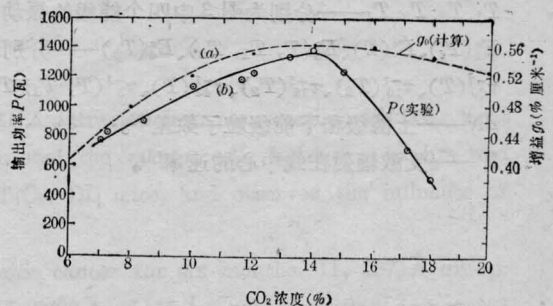


图12 CO_2 浓度对输出功率和增益的影响
(a)一增益计算值 g_0 ；(b)一输出功率实验值 P

12 所示。曲线表明,激光输出功率受 CO_2 水份的影响很大,当 CO_2 浓度为 14% 左右时激光输出功率最大。

CO_2 主要是通过增益来影响输出功率的,图中还以上述模型计算了增益随 CO_2 水份的变化关系。

六、讨 论

通过以上的实验和计算,可以表明不用 He 气而用普通的空气和工业纯的 N_2 作为工作介质同样可以得到大功率的激光输出,只是其效率较低。由于这里是用空气中的水份作为消激活下能级,因此水的浓度对增益及

输出功率有十分重要的影响。本试验的水水份是 1.3~0.87%,由于没有采取有效的控制手段,因此这并不是最佳的水水份,如果采用了控制进入气流的水份,则有望得到更高的输出。同时实验和计算也表明要向下游扩大放电体积,采用高速流动是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] K. R. Maness, H. J. Seyuin; *J Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 12, 5073.
- [2] O. P. Judd; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, No. 10, 4572.
- [3] Smith K., Thomson R. M.; "Computer Modeling of Gas Lasers", New York, Plenum Pr.
- [4] R. L. Taylor; *Reviews of Modern Phys.*, 1969, **41**, No. 1.

附 录

γ ——气体比热比。

R ——气体常数。

E ——电场强度,这里假设沿流场是均匀分布。

$j(x)$ ——电流密度,这里假设沿流场是均匀分布。

$N_e = j(x)/e \cdot v_d$ ——电子密度。

e ——电子电荷量。

v_d ——电子迁移速率^[2]。

$N_{\text{CO}_2}, N_{\text{N}_2}$ ——分别为 CO_2, N_2 的分子密度数。

h ——普兰克常数。

f_1, f_2, f_3, f_4 ——分别为图 3 中四个能级的频率值^[3]。

$$f_L = \frac{c}{\lambda}$$

c ——光速。 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。

X_1, X_2, X_3, X_4 ——分别为图 3 中四个能级的有效电子振动激发速率^[3]。

T_1, T_2, T_3, T_4 ——分别为图 3 中四个能级的振动模瞬时有有效温度^[1]。

$E_1^0(T_1), E_2^0(T_2), E_3^0(T_3), E_4^0(T_4)$ ——分别表示 E_1, E_2, E_3, E_4 的平衡值^[1]。

$\tau_{20}^{-1}(T), \tau_{10}^{-1}(T_2), \tau_{12}^{-1}(T_2), \tau_{43}^{-1}(T), \tau_3^{-1}(T, T_1, T_2)$ ——分别为图 3 所示的弛豫速率^[3,4]。

ΔN ——上能级和下能级粒子数差^[3]。

W ——受激辐射在线中心的速率^[3]。