

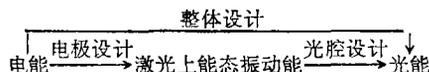
自持放电横流 CO₂ 激光器中影响效率的一些因素

徐纪华 孙丽吟 楚泽湘 吴中祥
(中国科学院力学研究所)

提 要

本文用一维定常流动、准二维放电、三振型弛豫模型、计算分析了自持放电横流 CO₂ 激光器的输入电能→激光上能态振动能→输出光能以及输入电能→输出光能诸过程的转换效率随电极宽度、气流速度和光腔位置等参数的变化规律,从而为器件的放电条件、流动参数、光腔结构的合理设计提供理论依据。

本文从提高器件效率的角度,在给定气压气体混合比和光腔参数等条件下,研究放电条件,流动速度和光腔位置等因素对器件输出功率和效率的影响。一个激光器由输入电能经转换成激光上能态振动能继而转换成输出光能的整个过程的总效率 $\bar{\eta}_{BI}$ 可分解为电能转换成激光上能态振动能的效率 $\bar{\eta}_{BV}$, 激光上能态振动能转换成光能的效率 $\bar{\eta}_{VI}$ 两部分,它们的大小分别反映器件的整体设计以及电极设计和光腔设计的好坏。可用图解表示如下:



本文将综合研讨上述诸因素,为制订器件最佳设计方案提供理论依据。

一、模型与假定

我们考虑的装置示意图如图1所示,其中阴极 A_1A_2 , 阳极 B_1B_2 的宽度分别为 a 和 b , 平均宽度 $w = (a+b)/2$, 电极间距 AB 为 h , 梯型倾角为 θ (改变 w 就能得出同一 θ 和 h 下的不同的 a 和 b , 为便于研究,以后均用 w 表示电极宽度)。为简化起见,假定光腔由两块平行平面镜构成,腔长为 L , 镜宽为 l , 镜面反射系数分别为 r_1 和 r_2 , 镜片中心位置为 $w_0 = (D_1 + D_2)/2$ (D_1 和 D_2 分别是方向上镜子的边缘位置)。

设放电参数(电子密度 n_e 、 E/N 等)、流动条件沿 Y 方向为常数,沿 Z 方向可以不均匀,另外还假定:

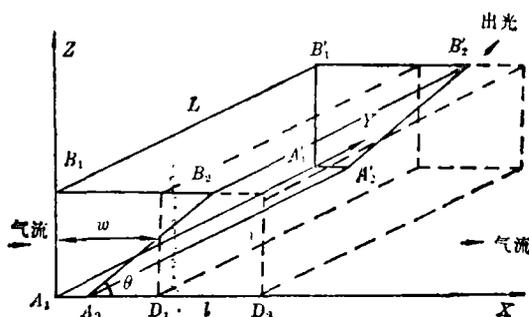


图1 自持横流 CO₂ 激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a self-sustained transverse-flow CO₂ laser

收稿日期: 1985年3月12日; 收到修改稿日期: 1985年7月19日

(1) 光强 I 沿 X 、 Y 方向为常数、沿 Z 方向的变化采用分层计算, 所用的稳定振荡条件为

$$\int_0^l G dx = -(l/2L) \ln(r_1 r_2), \quad (1)$$

式中 G 为饱和增益;

(2) 用于转换成光能的振动能近似地等于 $I=0$ 时的介质受电激励产生的激光上能态的全部振动能;

(3) 忽略置于放电区内光腔部分的介质被二次激发产生的振动能。

输入的电功率是扣除了阴极、阳极位降后用于激励介质的电功率

$$W_E = J E h, \quad (2)$$

式中 J 是总电流、 E 是电场强度。

单位时间内 m 克介质通过电激励区, 激光上能态获得的振动能

$$W_V = \int_0^m \frac{E_V(x)}{t} dm = \rho u A \int_0^k \frac{E_V(x)}{x} dx, \quad (3)$$

式中 ρ 、 u 、 A 和 k 分别是介质密度、流速、流动截面积和电激励区长度, $E_V(x)$ 为 x 点上介质在激光上能态的振动能

$$E_V(x) = \sum_{i=3}^4 E_{V_i}(x) = \sum_{i=3}^4 \frac{g_i \psi_i R_i Q_i}{\exp(Q_i/T_i) - 1}, \quad (4)$$

其中 g_i 、 ψ_i 、 T_i 、 Q_i 、 R_i 分别是第 i 能态的简并度、克分子分数、振动温度、特征温度和介质气体常数, $i=3, 4$ 分别表示 $\text{CO}_2(001)$ 、 $\text{N}_2(v=1)$ 能态。

介质在单位时间内输出光能

$$W_I = \alpha I S, \quad (5)$$

式中 α 和 S 分别是耦合度和输出镜面积。

计算是在给定初始条件下(表1), 对某一给定 z 值的 X - Y 平面, 将一维流动守恒方程组和三振型弛豫方程组联立, 用龙格-库塔法数值求解, 得出不同流速、电极宽度、光腔位置以及电流下沿流动方向的 T 、 T_i 、 G 和 I , 并通过方程 (2)~(5) 式求得单位时间的电能、振动能和光能及其效率

$$\eta_{EV} = (W_V/W_E), \quad \eta_{VI} = (W_I/W_V), \quad \eta_{EI} = (W_I/W_E). \quad (6)$$

再对不同 z 值各平面上的效率求平均, 得到整个器件的平均效率, 记为 $\bar{\eta}_{EV}$ 、 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 。

表1 初始条件

Table 1 Initial conditions

J (A)	E/N (V·cm ²)	$\psi_{\text{CO}_2}:\psi_{\text{N}_2}:\psi_{\text{He}}$	P_0 (Torr)	T_0 (K)	l (cm)	h (cm)	α (%)
10	2.2×10^{-16}	0.05:0.27:0.68	20	293	5	3	28

二、结果与讨论

1. 电极宽度和流速对 $\bar{\eta}_{EI}$ 的影响

图2是 $I=0$ 的条件下, $\bar{\eta}_{EV}$ 随 w 和 u 变化的结果。对于同一流速, 电极宽度越小, $\bar{\eta}_{EV}$

越大;对于同一电极宽度,流速越大, $\bar{\eta}_{EV}$ 越大,这种现象在低速段尤其明显。随着流速增大(如 $u \sim 100$ m/s),不同宽度电极间的 $\bar{\eta}_{EV}$ 曲线逐渐靠近。

$\bar{\eta}_{EV}$ 随电热宽度 w 变小而增大的主要原因是由电子密度 n_e 增大而引起的。因为

$$n_e = (j/e\bar{v}_e) = (J/wLe\bar{v}_D), \quad (7)$$

式中 j 是电流密度, e 是电子电量, \bar{v}_D 是电子迁移速率。在 J 和 L 一定时,电子密度随 w 变小而增大, n_e 的增大有利于将 CO₂ 和 N₂ 激发到上能态,使 W_V 增加,所以在 W_B 一定时, $\bar{\eta}_{EV}$ 随 w 变小而增大。

$\bar{\eta}_{EV}$ 随流速 u 的增大而增大,主要的原因是 u 的增加导致单位时间通过激励区的分子数增多,相应的振动能也增大。但这种增大并不是无限的,因为输入电能一定时,随着电子能量被充分利用, $\bar{\eta}_{EV}$ 应趋于定值。

因此建议在设计电极尺寸时,可优先采用窄形电极,适当提高流速,以提高效率 $\bar{\eta}_{EV}$, 节省电能。

2. 电极宽度和流速对 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响

固定运转条件,把光腔中心放在 $w_0 = 5.5$ cm 处,研究 w 和 u 对 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响。从图 3 和图 4 可以看出:在低速端, $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 随电极宽度 w 变小而减小,在高速端,却随 w 变小而增大。

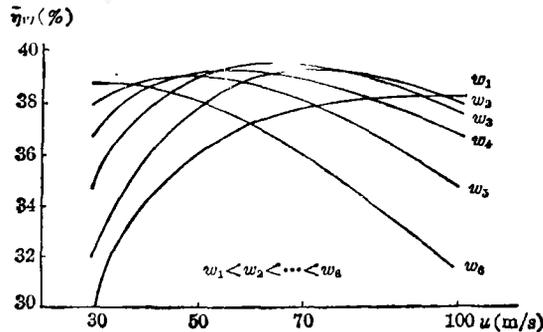


图 3 w 和 u 对 $\bar{\eta}_{VI}$ 的影响

Fig. 3 Efficiency $\bar{\eta}_{VI}$ as function of w and u

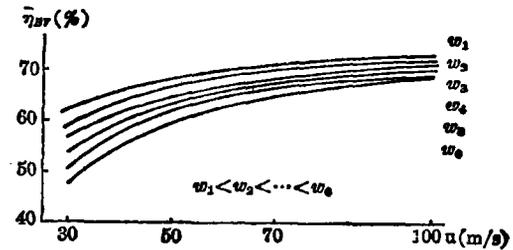


图 2 $\bar{\eta}_{EV}$ 随 w 、 u 的变化

Fig. 2 Efficiency $\bar{\eta}_{EV}$ as function of w and u

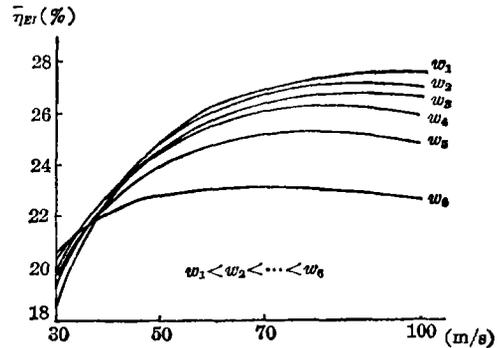


图 4 w 和 u 对 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响

Fig. 4 Efficiency $\bar{\eta}_{BI}$ as function of w and u

这种变化规律可以微观机理来解释:一定流速下,若 J 为常数,由方程 (7) 可知, w 变窄使 n_e 增大, n_e 的增大加速电子和分子的碰撞激励过程,使 W_V 增大,从而有更多的 W_V 用于出光;但在光子受激发射过程中,激光下能级布居数和振动温度将上升,又由于 ν_1 和 ν_2 能级的费米共振以及 ν_2 和平动的快速消激发过程,使平动温度 T 也上升,因而不利于出光。这两个因素的共同作用,决定了 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 具有图 3、图 4 的变化规律。当流速过低时,废能不能被有效排除,电极变窄而引起 T 、 T_1 上升也相对较快,从而使出光功率 W_I 略有减小, $\bar{\eta}_{BI}$ 也随之稍有减小。但振动能随电极减小迅速增大,所以 $\bar{\eta}_{VI}$ 明显下降,如 $u = 30$ m/s,当 w 从 8 cm 减到 3 cm,缩小了二倍多, W_I 从 850 W 减到 795 W,只降了 60%。但 W_V 却从

2119 W 增大到 2700 W, 增长了 27%。反之, 当流速较小时, 废能被有效排除掉, 则上述因 w 变小而引起 T 上升的不利因素得到克服(表 2), W_I 随电极变窄而增大, 于是 $\bar{\eta}_{BI}$ 和 $\bar{\eta}_{VI}$ 都随电极变窄而增大。

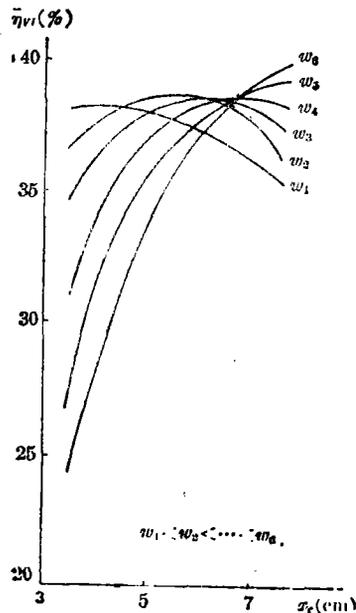
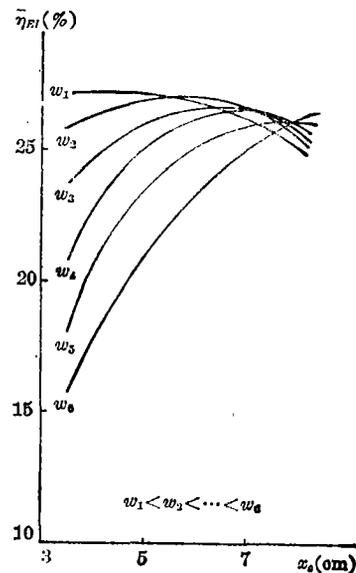
表 2 光腔出口处 T 、 T_1 随 u 的变化Table 2 Changes in T and T_1 with u at the exit of cavity

u (m/s)	30	50	70	100
T (K)	445.7	379.5	351.3	331.0
T_1 (K)	448.7	384.5	358.8	341.8

从上述计算结果, 因此建议: 为获得较高的 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$, 对于一定宽度的电极应配以相应的流速, 低速下, 电极应加宽, 高速下, 电极应变窄。

3. 电极宽度与光腔相对位置对 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响

在中等流速 $u=70$ m/s 时, 改变电极宽度和光腔相对位置对 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响示于图 5 和图 6, 图中电极宽度分别为 $w_1=3.8$ cm、 $w_2=4.2$ cm、 $w_3=5.5$ cm、 $w_4=6.4$ cm、 $w_5=7.2$ cm 和 $w_6=8$ cm。显然, w 和 x_c 越接近, $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{BI}$ 就越高。如 $w=3.8$ cm 的电极, 光腔中心放在 $x_c=3.5$ cm 处效率较高。如果光腔往后移出了电激励区, 由于碰撞弛豫等原因, 可用振动能不断下降, 转化成的光能也就降低。效率也随之而降。如果光腔太靠前, 介质尚未被充分激励, 没有足够的振动能可被转换成光能, 效率也同样低。对于这样的中等流速, 将光腔中心放在电极平均宽度出口处($x_c=w$), 能最有效地发挥增益的作用, 获得最大的效率。这就提供了一个比用测量小信号增益以确定光腔中心位置更为直接的方法。

图 5 w 和 x_c 对 $\bar{\eta}_{VI}$ 的影响Fig. 5 Efficiency $\bar{\eta}_{VI}$ as function of w and x_c .图 6 w 和 x_c 对 $\bar{\eta}_{BI}$ 的影响Fig. 6 Efficiency $\bar{\eta}_{BI}$ as function of w and x_c .

但在流速变化时, x_0 应作相应改变。由图 7 和图 8 可以看出: 为使 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 都保持较高的值, 流速高时 ($u > 70$ m/s), 光腔中心应向后移; 反之应向前移。这与小信号增益峰值位置随速度增大而后移的结果是一致的。因为光腔中心放在小信号增益峰值附近时, 能使增益有效发挥。在一定的腔位置下, 不应随意改变流速, 过高增加流速, $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 不会明显提高, 只会浪费输入能量(如增加流速消耗的电能、激活介质的流失增多等)。

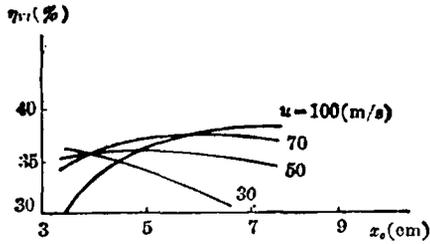


图 7 x_0 和 u 对 $\bar{\eta}_{VI}$ 的影响

Fig. 7 Efficiency η_{VI} as function of x_0 and u

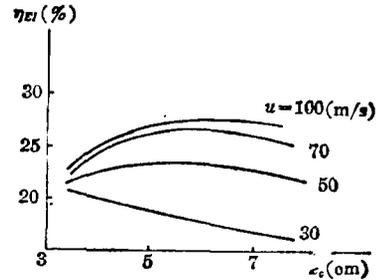


图 8 x_0 和 u 对 $\bar{\eta}_{EI}$ 的影响

Fig. 8 Efficiency η_{EI} as function of x_0 and u

4. 输入电流和流速对效率的影响

上述结果都是在一定输入电流 ($J = 10$ A) 条件下得出的。若固定其它初始条件, 并取 $w = x_0 = 5.5$ cm, 然后改变输入电流(未计及增大电流产生弧光放电的情况)和气流速度, 考察它们对效率和输出功率的影响。从图 9 可见: 流速一定, 电光效率随 J 增加而渐降, 出光功率却随 J 增加而明显增加, 并在 $J = J_c$ 时达到极大, 然后略有下降。这是因为随 J 的增大, 激光上能级能量几乎线性增加, 所能提取的光能也随之增大; 与此同时, 光的发射及弛豫过程使 T_1 、 T_2 和 T 上升, 提高了 CO₂ 下能级和平动能级的能量, 更多的电能转化为废热, 不利于光能的输出。从图 10 看出, 当 $J < J_c$ 时, 光腔内激光下能级和平动能级能量的净增加 ΔW_1 随 J 增长的速率比上能级能量的净增加 ΔW_2 的增长速率小, 因而 W_I 迅速增大; 当 $J = J_c$ 时, 两者的增长速率基本相等, W_I 达到极大; 当 $J > J_c$ 时, 后者的增长速率大于前者, W_I 趋于下降。可见 $J < J_c$ 时, 提高功率是以降低效率为代价的, 而当 $J > J_c$ 时, 功率和

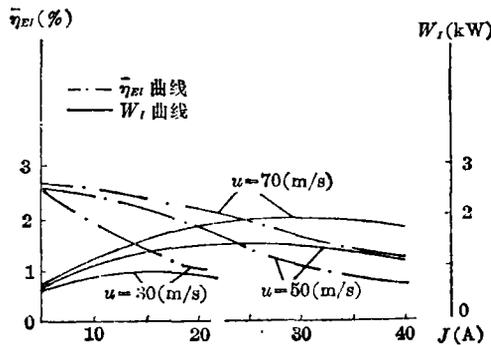


图 9 J 和 u 对 W_I 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 的影响

Fig. 9 W_I and $\bar{\eta}_{EI}$ as functions of J and u

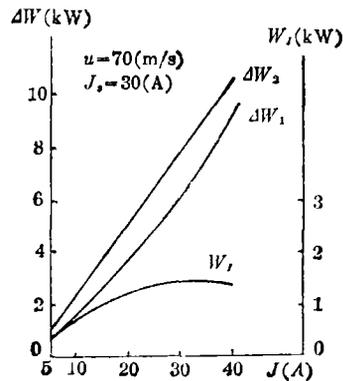


图 10 光腔内 ΔW_1 、 ΔW_2 和 W_I 随 J 的变化

Fig. 10 ΔW_1 , ΔW_2 and W_I as functions of J

效率都下降,这是不可取的。因此,输入电流不宜过大($J \leq J_s$)提高流速,能降低 T' 和 T_1 , 提高光能的输出,相应的极点 J_s 向 J 增大方向移动。实际上,过分苛求提高效率(损失出光功率为代价)或提高出光功率(损失效率为代价)都是不可取的。考虑到功率和效率的综合效果,我们定义 J_{optimum} 为最佳电流,表 3 列出不同流速下的 J_{opt} 以及相应的功率和效率,并与 $J = J_s$ 的结果作了比较,可见取 $J = J_{\text{opt}}$ 时,即能大大提高出光功率又不致于使电光效率显著下降。

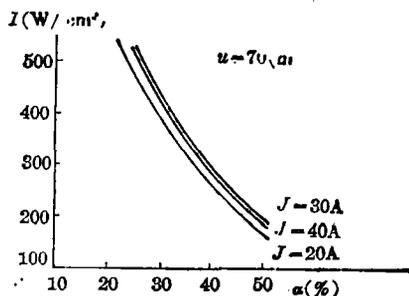


图 11 α 和 J 对 I 的影响

Fig. 11 I as function of α and J

表 3 结果都是同一耦合度($\alpha=28\%$)得出的。由图 11 可知, W_I 随 J 变化的规律在不同耦合度下仍然成立。

表 3 不同 u 和 J 情况下的功率和效率

Table 3 Powers and efficiencies at different u and J

u (m/s)	J (A)	W_I (W)	$\bar{\eta}_{EI}$ (%)	$\frac{W_I(J) - W_I(J=5)}{W_I(J=5)}$	$\frac{\eta_{EI}(J) - \eta_{EI}(J=5)}{\eta_{EI}(J=5)}$
30	J_{opt} 10	840	19.3	54	-23
	J_s 15	924	14.2	69	-43
50	J_{opt} 15	1361	20.6	128	-25
	J_s 20	1468	19.0	150	-31
70	J_{opt} 20	1806	20.8	219	-20
	J_s 30	2016	15.5	256	-41

三、结 语

详细考察了电极宽度 w 、流速 u 和镜片中心位置 x_0 对 $\bar{\eta}_{EV}$ 、 $\bar{\eta}_{VI}$ 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 三种效率的影响,以及 J 和 u 对 W_I 和 $\bar{\eta}_{EI}$ 的影响,得到了有利于提高功率和效率的一些规律:

(1) 输入电流不变,电极宽度窄一些为好。

(2) 在不出现弧光,维持正常放电的条件下,根据不同流速,相应提高输入电流 ($J < J_s$),对 $\bar{\eta}_{EI}$ 影响不大,却能显著增加出光功率。

(3) 中等流速时,光腔中心位置应放在电极平均宽度处 ($x_0 = w$)。但低速时,光腔应适当前移,使 $x_0 < w$; 高速时,光腔应适当后移,使 $x_0 > w$ 。

本文的计算只考虑用于激励分子的电能,实际消耗的电能应包括阴极位降、镇流电阻等的能耗。为了便于和实验比较,我们以输入总电能为基准,将理论结果和实验进行比较,从表 4 可见理论值略大于实验值,这是合理的。

表 4 理论和实验的比较*

Table 4 Comparison between results of theory and experiment

初 始 条 件								理 论 值		实 验 值	
P_0 (Torr)	$\psi_{CO_2}:\psi_{N_2}:\psi_{He}$	T_0 (K)	u (m/s)	w (cm)	x_c (cm)	W_E (W)	α (%)	W_I (W)	$\bar{\eta}_{EI}$	W_I (W)	η_{RI}
20	0.05:0.27:0.68	293	70	5.5	5.5	9360	28	1155	12%	1007	10.8%

参 考 文 献

- [1] 陈丽吟, 楚泽湘等; 《光学学报》, 1985, 5, No. 2 (Feb), 135.

Some factors influencing efficiencies of self-sustained discharge transverse-flow CO₂ lasers

XU JIHUA CHEN LIYIN CHU ZEXIANG AND WU ZHONGXIANG

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

(Received 12 March 1985; revised 19 July 1985)

Abstract

Theoretical computations and analyses are made of the efficiencies of self-sustained discharge transverse-flow CO₂ lasers. A model of one-dimensional steady flow, quasi-two dimensional discharge and three vibrational relaxing modes is used under various conditions of discharge, flow and cavity position in the flow direction. Efficiencies of the cascade processes (input electrical energy—energy of upper vibrational levels, energy of upper vibrational levels—output laser energy, and input electrical energy—output laser energy) are given as functions of electrode width, gas-flow velocity and cavity position. A theoretical reference is thus provided for properly selecting laser parameters, such as discharge conditions, flow parameters and cavity configurations.

* 实验数据取自本所 JL6A 型千瓦 CO₂ 激光器。