

# 自持电激励横流 CO<sub>2</sub> 激光器的最佳输出功率

楚泽湘 陈丽吟 吴中祥

(中国科学院力学研究所)

**提要:** 本文研究了横流 CO<sub>2</sub> 激光器电激励区的形状、光腔位置、反射镜的大小、耦合度、介质流速诸因素对输出功率的影响, 得到了一批规律性的结果, 可为实验研究和器件设计提供参考。

## Optimum output power of a self-sustained discharge transverse flow CO<sub>2</sub> laser

Chu Zexiang, Chen Liyin, Wu Zhongxiang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** The influence of physical and construction parameters, such as the shape of discharge region, the position of cavity, the size and coupling of mirrors and the velocity of flow gas etc., on the output power of a transverse flow CO<sub>2</sub> laser are investigated. Some regular results have been obtained which are useful in laser design and experimental work.

### 一、引言

文献[1]采用文献[2]所用的简单放电模型计算分析了横向流动电激励 CO<sub>2</sub> 激光器光腔中的饱和增益和输出功率, 给出了准二维计算横向流动电激励 CO<sub>2</sub> 激光器输出功率的简便方案。本文是采用此方案研究存在辐射场的条件下电激励区的形状、光腔位置、反射镜的形状大小、输出耦合度、介质流速等因素对输出功率的影响。

装置的示意图见图 1。金属板 ABCD 为

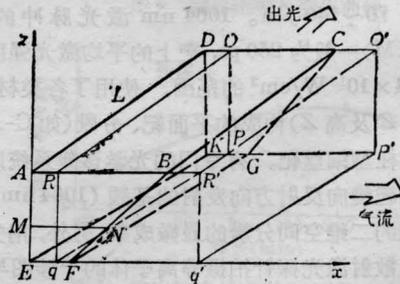


图 1 横流自持放电 CO<sub>2</sub> 激光装置图  
ABCD 为阳极, AB=a; EFGK 为阴极, EF=b

阳极, EFGK 为阴极(可以是管、板或针状), 极间距离 AE=H。假定电激励区内的电子

收稿日期: 1985年3月15日。

密度  $n_e$  沿  $x$  方向是均匀的, 沿  $z$  方向可有差异, 即

$$n_e = \frac{J}{L \cdot f(z) \cdot e \cdot v_D} \quad (1)$$

其中  $J$  为总电流,  $L$  为腔长,  $v_D$  为电子的迁移速率,  $e$  为一个电子的电量,

$$f(z) = \left[ b + \frac{(a-b)}{H} z \right] \quad (2)$$

为高度  $z$  上电激励区的宽度, 其中  $a=AB$ ,  $b=EF$ , 分别为阳、阴极在  $X$  轴上的宽度。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{He}$  混合的工作气体从  $\Delta EKD$  平面流入, 在与气流和电场都垂直的方向上放上谐振腔的镜子  $OO'P'P$  和  $qq'R'R$ , 镜面上的反射系数分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。

与文[1]相同, 对固定高度  $z$  将一维理想气体的守恒方程和弛豫方程联立, 求解该  $z$  层的场强、饱和增益和气流参数的一维分布。由不同  $z$  层计算结果即得到仅考虑对各层电子密度不同而形成的  $x-z$  平面的准二维分布。弛豫模型仍采用三振型系统。由方程(1)可见, 对于象三角形与梯形形状的电激励区, 腔中电子密度  $n_e$  将沿高度  $z$  而变化, 这必然会使得光强  $I$  也随高度  $z$  而变化。为了研究电激励区形状对光强的影响, 本文采用沿高度  $z$  分层估算输出功率, 即考虑在镜面各确定的高度  $z$  上, 取光强  $I$  沿  $x$  为常数以估算各层的输出功率。这相当于对腔体各高度  $z$  作切片处理。而相应各层, 光腔的稳定振荡条件为<sup>[1]</sup>:

$$\int_0^w G dx = \frac{w}{2L} \ln(R_1 R_2) \quad (3)$$

式中  $w$  为镜宽。此式表示当考虑到辐射场在光腔中沿流动方向的整体振荡效应时增益和损耗的关系。

## 二、计算结果与分析

计算选用的典型运转条件为: 进口条件——初始温度  $T_0=293\text{ K}$ , 初速  $u_0=70\text{ m/s}$ , 初始压力  $P_0=20\text{ Torr}$ , 组分  $\psi_{\text{CO}_2}:\psi_{\text{N}_2}:\psi_{\text{He}}=$

$5:27:68$ ,  $E/N=2.2 \times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ 。

### 1. 电激励区形状的影响

图2是将长5cm、高3cm的镜片前沿放在距气流入口1cm处, 电激励区分别为三角形( $AB=10\text{ cm}$ )和梯形( $AB=8\text{ cm}$ ,  $EF=3\text{ cm}$ )时, 光强随高度  $z$  的分布情况。由图可见, 光强随高度的变化前者较后者剧烈, 这可由电子密度  $n_e$  沿高度  $z$  和电激励区形状(宽度  $MN$ )的变化而得到解释。由方程(2)可见  $n_e$  与  $f(z)$  成反比, 所以  $f(z)$  越窄,  $n_e$  越大。但  $f(z)$  正比于  $z$ , 电子密度及相应的光强随  $z$  的变化相对较为剧烈, 而对于梯形激励区,  $b \neq 0$ ,  $f(z)$  随  $z$  的变化相对较为平缓, 电子密度及相应的光强随  $z$  的变化也较为平缓。如果我们选用矩形的电激励区( $AB=EF$ ), 电子密度  $n_e$  沿  $z$  的方向是常数, 此时光强将是上下均匀一致。但由于此时  $E/N$  是沿  $x$  方向略有上升的( $E$ 为场强,  $N$ 为单位体积总粒子数), 功率还会因此而有所增加, 从计算中知道, 这种因素使功率增加约为10%。

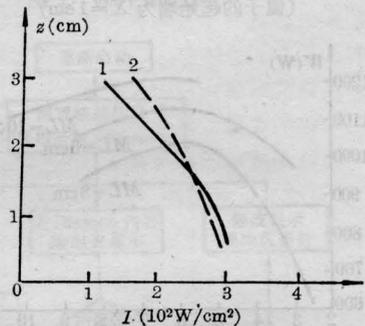


图2 放电区形状对光强的影响  
曲线1—三角形放电区; 曲线2—梯形放电区

上述结果说明在本文计算条件下, 增加  $n_e$  有利于提高光强和输出功率, 所以在一定范围内适当提高输入电流或缩短流动方向的电激励区而使  $n_e$  增大, 能够相应地提高腔内光强和输出功率。

### 2. 镜子的长度、位置对输出功率的影响

为了判断镜长对输出功率的实际作用, 对同一运转条件, 我们采用镜高为3cm, 镜子的起始位置在  $X=1\text{ cm}$  处, 镜长分别为3、

5、7、8、9、10、12、14、17 cm, 算出它们各自在半高处的光强和镜面上的输出功率

$$W = \bar{I} \cdot A \cdot C$$

$\bar{I}$  为光强沿  $z$  的平均值,  $A$  为镜子的面积,  $C$  为输出耦合度 (这里取 0.28)。从图 3 中看出, 随镜子的长度不同, 输出的功率也不同。开始功率随镜长变化较大, 随后渐趋平缓。当镜长取  $\sim 10$  cm 时, 镜面上的输出功率最高, 当镜长再增加时, 功率反而稍有下降。过长镜片输出功率的下降是由于碰撞弛豫的消激发。

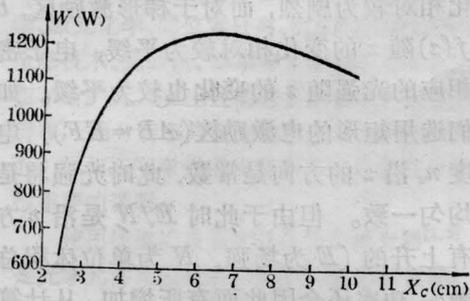


图 3 镜长(镜中心位置  $X_c$ )与输出功率的关系  
(镜子的起始端为  $X=1$  cm)

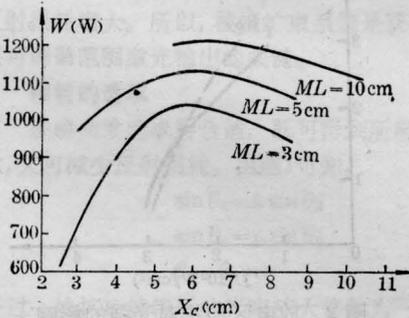
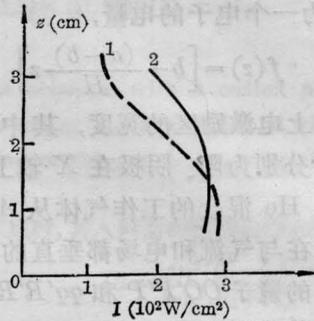


图 4 不同镜长( $ML$ )的镜中心位置  
与输出功率的关系  
( $f(z)=5$  cm,  $G_{0max}=5.5$  cm 处)

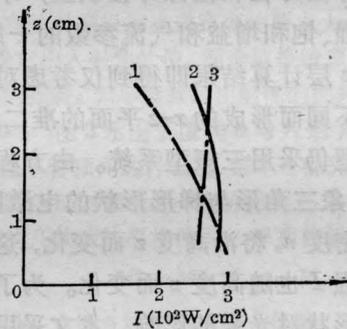
图 4 是考虑在同一运转条件下, 某一固定的镜长(分别为 10、5 和 3 cm), 镜中心的位置  $X_c$  与相应镜面上的输出功率的关系图。从图中我们看出:

(1) 不论镜子的长短如何, 对于同样的镜长, 镜子中心  $X_c$  放在小信号增益峰值附近有最大的输出功率, 小信号增益曲线见图 7。

(2) 镜子中心沿流动方向移动时, 它们的输出功率也相应改变。当镜子较长时, 它已基本覆盖小信号增益曲线(图 7 曲线 2)整个区域, 所以输出功率随  $X_c$  的变化不会很



(a) 三角形电场光强沿  $z$  的分布  
曲线 1— $X_c=3.5$  cm,  $\bar{I}=215$  W/cm<sup>2</sup>;  
2— $X_c=5.5$  cm,  $\bar{I}=251$  W/cm<sup>2</sup>



(b) 梯形电场光强沿  $z$  的分布  
曲线 1— $X_c=3.5$  cm,  $\bar{I}=225$  W/cm<sup>2</sup>;  
2— $X_c=5.5$  cm,  $\bar{I}=267$  W/cm<sup>2</sup>;  
3— $X_c=7.5$  cm,  $\bar{I}=268$  W/cm<sup>2</sup>

图 5 光强沿  $z$  的分布

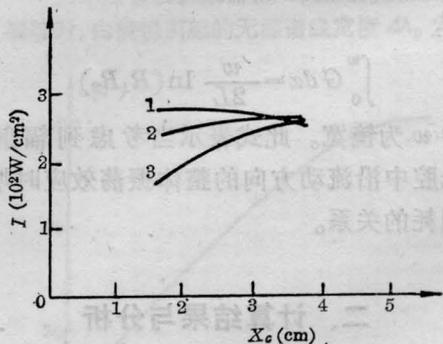


图 6 不同电极宽度时镜中心位置  
与光强的关系

曲线 1— $f(z)=3.8$  cm;  
2— $f(z)=5.5$  cm;  
3— $f(z)=8$  cm

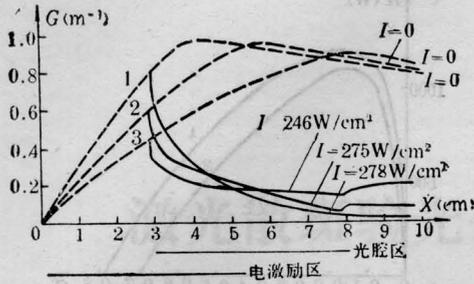


图7 不同高度上的小信号增益和饱和增益的分布  
 曲线 1— $f(z)=3.8$  cm;  
 2— $f(z)=5.5$  cm;  
 3— $f(z)=8$  cm

大。当镜子较短时,它所覆盖的增益区较短,其输出功率随  $X_0$  变化较大。如果把镜中心位置由最佳位置向前移动,发现功率下降较快。这是因为镜子进口处的增益值较小,电激励激发不够充分,以及镜子的出口增益有些流失的缘故。当镜子从最佳位置向后移数厘米时输出功率下降较平缓,因为此时镜子的进口处小信号增益  $G_0$  较大,过了峰值后变化平缓,能把电激励后的振动能量基本上取了出来。

(3) 放置在上述最佳位置处的镜子,镜长为 5 cm 和 3 cm 镜子的输出功率分别比 10 cm 的镜子减少 9% 和 14%。这说明在短镜的腔中流失的可用激光虽比长条镜多一些,但损失也并不太大。

现在来研究同一镜子 ( $3 \times 5 \text{ cm}^2$ ) 所处的不同位置对光强沿  $z$  的分布和输出功率的影响。固定光腔位置,当  $z$  较小时,按方程(2)电激励区较窄,当总电流  $J$  保持不变,电子密度应较大,小信号增益可较快达到峰值(图7曲线1)。如果这时把镜面前沿放在对应的小信号增益的峰值区,则在光腔中较小  $z$  处取出的光强(或输出功率)可较大;当  $z$  较大时,电激励区就相对增长,电子密度也相对较少,小信号增益的峰值就靠后(图7曲线2、3)。若镜子的位置不变,光腔中较大  $z$  处进口的增益较小,可取出的光强就较低。造成光强  $I$

(或输出功率)随  $z$  的增大而下降的现象。解释了图5中各条曲线沿  $z$  的变化情况。而这种分布是与电极形状和光腔位置密切有关的。

但实际测量表明,小信号增益的峰值位置随  $z$  的变化并不很敏感。这是因为本文放电模型把各高度的电子密度当作均匀分布的简单处理。而且在此模型中所取电激励区随高度的变化较大,因而相应地夸大了沿  $z$  的变化,以后将在进一步修改模型的基础上予以改进。但本计算说明  $n_0$  对  $G_0$  和  $I$  的关系,以及用小信号增益峰值的位置来选定光腔最佳位置等规律仍能与实验事实基本相符。

在给定的初条件下,把镜子放在不同的位置,镜面上的光强沿  $z$  分布及输出功率是不同的,如图5(b)表明了镜子中心  $X_0$  分别放在 3.5、5.5 和 7.5 cm 处,光强随  $z$  的变化。随  $X_0$  的后移,光强沿  $z$  方向的分布更为均匀,这是因为随着镜子的后移,在整个光腔区内各高度上可供利用的增益均接近峰值的缘故。图6给出不同电极宽度时,光强(输出功率)与镜面位置的关系,各曲线上呈现不同的最佳输出功率位置,并且在各曲线上最佳位置处的光强(或输出功率)都相近,而最佳位置则随  $f(z)$  的增长而后移,这也用小信号增益分布及其在光腔区内有效利用程度的不同来解释。这些变化规律说明,输出功率不仅与电激励区内电子密度、电激励区的宽度,还与镜片与电极的相对位置有关。因此在针-板或管-板等不同的电极结构中,由于沿  $z$  方向(即不同高度)放电区宽度不同,各  $z$  层增益的有效利用程度不一样,镜子的起始位置应以能使光腔区内各  $z$  层气流的增益都能较充分地利用为好。

### 3. 流速与镜面位置的关系

由于流速对增益曲线有影响<sup>[1]</sup>,所以在不同的流速条件下最佳位置范围也相应改变。流速  $u=70$  m/s, 镜子中心  $X_0=7.5$  cm 时的光强较均匀,镜面的输出功率也较高。但

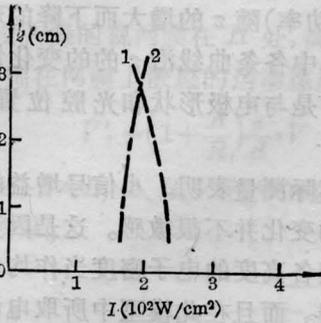


图8 流速为 30 m/s 时镜面位置与光强分布的关系

曲线 1— $X_c=3.5$  cm,  $\bar{I}=198$  W/cm<sup>2</sup>(梯形电场)  
2— $X_c=7.5$  cm,  $\bar{I}=169$  W/cm<sup>2</sup>

表1 镜面位置与光强及输出功率的关系  
( $X_c$  为镜中心位置, 镜长 5 cm)

$u$	30 m/s			70 m/s			
	$X_c$ (cm)	3.5	5.5	7.5	3.5	5.5	7.5
$\bar{I}$ (W/cm <sup>2</sup> )		198	197.7	169	225	267	268
$W$ (W)		832	830	710	945	1121	1126

$u=30$  m/s 时, 其光强分布和输出功率的最佳位置就发生了变化(见图 8 和表 1), 相应移至 3.5~5.5 cm 之间。这一结果与增益分布密切相关。在本文计算的运转条件下, 初速  $u=30$  m/s 时, 约在  $X_c=4$  cm 处增益的利用最有效; 初速  $u=70$  m/s 时, 约在  $X_c=7.5$  cm 处增益才能最有效地利用。

#### 4. 输出耦合度与光强及功率的关系

当放电区形状、位置和器件运转条件给定之后, 输出功率随输出耦合度的不同而显著变化, 与最大功率对应的耦合度称为最佳耦合度, 而最佳耦合度还随腔镜放置位置的不同而改变。

图 9 是采用阳极宽度为 8 cm、阴极宽度为 3 cm 的梯形电激励区和长为 5 cm 高为 3 cm 的镜子计算得出的耦合度和输出功率(以光腔半高处的光强当作平均光强)的关系。曲线 1、2 是光腔的镜子中心分别放在距入口处 5.5 cm、3.5 cm 处的情况。从图中看出曲线 1 截止耦合度较大, 而曲线 2 的截止

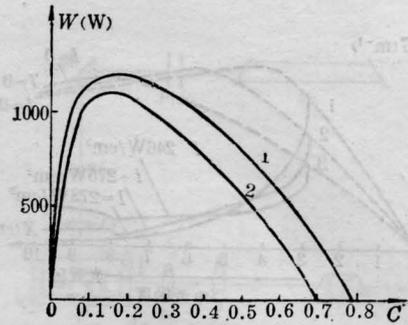


图9 梯形电场中耦合度与输出功率的关系  
曲线 1— $X_c=5.5$  cm; 2— $X_c=3.5$  cm

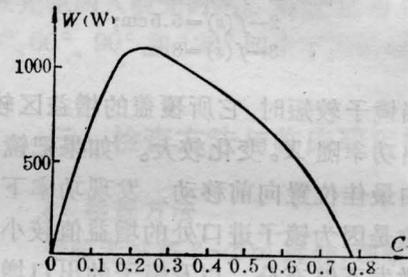


图10 三角形电场中耦合度与输出功率的关系  
 $X_c=5.5$  cm

耦合度较小, 两曲线均有一最佳耦合度, 其值约在 15~21% 之间。且由曲线可见, 当所取的耦合度略小于最佳耦合度时, 输出功率急剧下降, 但耦合度略大于最佳耦合度时, 功率的下降较为平缓。由于本文采用的放电模型<sup>[2]</sup>还较粗略, 最佳耦合度的计算值还不能与实测值准确相符, 因此耦合度以取稍大于最佳计算值并在其附近再以实验方法作适当的调整为好。在 JL6A 型器件上取相应条件的实验结果表明耦合度在 20~30% 之间出光较强且变化不大, 证实了上述结论。

图 10 是针对板(三角形电激励区)的情况, 与图 9 相似, 只是在耦合度小于最佳耦合度时, 功率下降更为剧烈, 当耦合度大于最佳耦合度时, 输出功率的变化更为平缓。

图 11 反映采用不同电极宽度(对应于不同的  $z$ )时耦合度与输出功率的关系。由图可见, 对于不同的电极宽度最佳和截止耦合度也都不同, 在所给的条件下, 截止耦合度最大相差 ~10%, 最佳耦合度最大相差 ~5%。

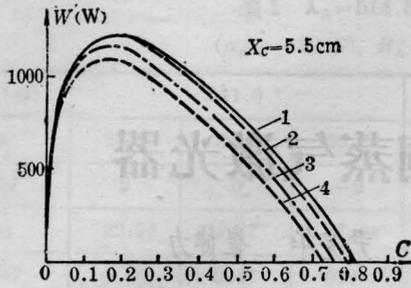


图 11 不同电极宽度下耦合度与输出功率的关系

曲线 1— $f(z)=3.8\text{ cm}$ ; 2— $f(z)=5.5\text{ cm}$ ;  
3— $f(z)=7.2\text{ cm}$ ; 4— $f(z)=8\text{ cm}$

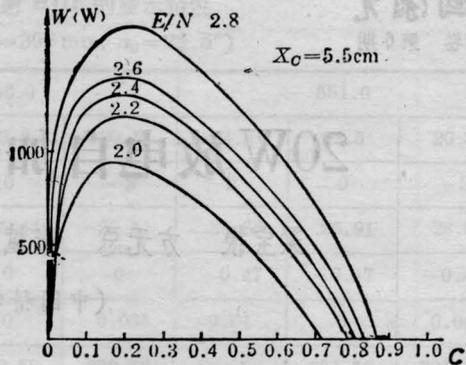


图 12  $E/N$  不同时耦合度与输出功率的关系

$E/N=(2.0\sim 2.8)\times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ ;  
 $f(z)=5.5\text{ cm}$

这种变化也可用电子密度的不同予以解释。

当极间电压变化时,  $E/N$  值也会有相应变化, 图 12 反映了  $E/N$  的变化对耦合度的影响。当  $E/N$  在  $2.8\sim 2.0\times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}$  范围内变化时, 输出功率、截止耦合度都随  $E/N$  值的增大而增大。但最佳耦合度却差别不大, 相差仅 6%, 可见  $E/N$  对最佳耦合度

的影响并不灵敏。

### 参 考 文 献

- [1] 陈丽吟等;《光学学报》,1985, 5, No. 2, 135~142.  
[2] 陈丽吟等;《中国激光》,1984, 11, No. 5, 257~262.

(上接第 337 页)

比例为 69:31, 两者都具有核自旋。根据超精细结构分量间允许的跃迁选择定则  $\Delta F=0$ ,  $\pm 1$  ( $\Delta F$  为原子态总角动量的变化), 并考虑到两同位素相应能级的磁偶极和电平方极分裂因子不同, 确定出 510.6 nm 线有 18 条和 578.2 nm 有 12 条超精细结构线。按 [1] 中的公式计算各分量相对于能级重心的频移。由 [2] 中的公式计算各分量间的相对强度。每一分量都假设是在  $T=1500^\circ\text{C}$  时的多普勒加宽线型。计算得到 510.6 nm 和 578.2 nm 线型分布图(图 10)。图中各垂直线的长度和位置代表各分量相对强度和位置。由图可见, 两

者线型都有三个峰, 其频率间隔为:

$\Delta\nu_1(\text{GHz})$	$\Delta\nu_2(\text{GHz})$
510.6 nm ~2.5	~2
578.2 nm ~5.3	~2.8

510.6 nm 三峰强度比较接近, 而 578.2 nm 线型中一峰强度明显大于其他两峰。这些估算结果都与实验相一致, 其误差是由计算和实验上的不精确造成的。实验发现, 三峰线型只在某些条件下出现。

### 参 考 文 献

- [1] H. Kopferman; "Nuclearmoments", Academic Press Inc., New York, 1958.  
[2] E. U. Condon, G. M. Shortley; "The Theory of Atomic Spectro", Cambridge, 1963, p. 424 and 238.

## 铀的共振三步光电离法通过技术鉴定

中国科学院技术科学部于 1985 年 12 月 28 日组织对中国科学院上海光机所的铀原子共振三步工作进行技术鉴定。

该所利用脉冲放电在铀的空心阴极中产生铀原

子蒸气, 用两台可调谐染料激光器进行三光子电离, 观察到铀原子的共振三步光电离。调谐激光器的输出波长, 测量得到一批激发态的光谱线。

(乙 凡)