

横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴位置的选择

程兆谷 王哲恩 查鸿逵 沈俊泉 陈可心 奚全新 王润文

(中国科学院上海光机所)

提要: 在合理近似条件下, 给出了横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴最佳位置的近似表达式。理论与实验较好地吻合。

Choice of the optical axis position for a transverse flow CO₂ laser resonator

[Chen Zhaogu, Wang Zheen, Zha Hongkui, Shen Junquan
Chen Kexin, Xi Quanxin, Wang Runwen

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

Abstract: Under the condition of reasonable approximation, an approximate formula is given for the choice of optical axis position for a transverse flow CO₂ laser resonator. The theory coincides well with the experimental results.

一、问题的提出

对水冷直管式 CO₂ 激光器而言, 谐振腔的光轴位置为放电管之轴线。横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴位置选择较之直管式 CO₂ 激光器要复杂得多, 少数情况下, 谐振腔区与放电区还分开^[1], 腔区置于放电区之下游。一般来说, 腔区与放电区处于同一位置和处于放电区下游相比, 前者比后者的光电转换效率要高 1.5~2 倍^[2]。

本文讨论谐振腔区与放电区处于同一位置情况下, 横流 CO₂ 激光器谐振腔最佳光轴位置的选择问题。

二、横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴位置的近似计算

图 1 给出了小信号增益沿气流方向(x 方向)的分布曲线^[3]。一般情况下, 增益并非沿某一 x 位置呈对称分布。假定 x_m 为谐振腔轴沿 x 方向的最佳位置, 考虑到谐振腔光线的“反演”作用^[4], 我们假定 $x = x_m$ 直线分割的增益区 I 和 II 面积相等(如图 1), 这里忽略了 $x > l$ 后的区域 III。作定积分^[3]

收稿日期: 1984年8月6日。

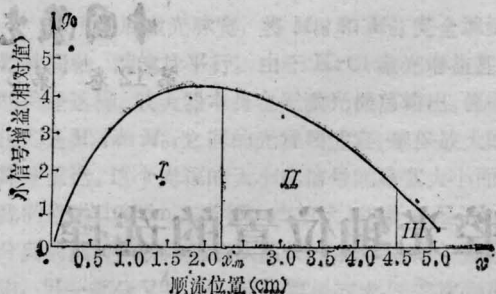


图1 横流 CO₂ 激光器小信号增益顺流分布

$$\int_0^{x_m} A \left(\lambda_u \cos \frac{\pi}{2l} x + \frac{\pi v}{2l} \sin \frac{\pi}{2l} x - \lambda_u e^{-\frac{\lambda_u}{v} x} \right) dx$$

$$= \int_{x_m}^l A \left(\lambda_u \cos \frac{\pi}{2l} x + \frac{\pi v}{2l} \sin \frac{\pi}{2l} x - \lambda_u e^{-\frac{\lambda_u}{v} x} \right) dx \quad (1)$$

式中 A 为常数; λ_u 为 CO₂ 激光上能级弛豫几率, $\lambda_u = (K_{un}\psi_n^2 + K_{uh}\psi_h^2 + K_{uc}\psi_c^2)p$, ψ_n 、 ψ_h 、 ψ_c 分别为 N₂、He、CO₂ 气体分压与混合气体压力之比, p 为混合气体压力(单位 Torr), K_{un} 、 K_{uh} 和 K_{uc} 分别为 N₂、He 和 CO₂ 气体的碰撞速率常数^[5]; l 为阳极条顺流方向长度(单位 cm); v 为气体流速(单位 cm/s)。

对(1)式积分, 可得,

$$\frac{2l\lambda_u}{\pi v} \sin \frac{\pi}{2l} x_m - \cos \frac{\pi}{2l} x_m + e^{-\frac{\lambda_u}{v} x_m}$$

$$= \frac{l\lambda_u}{\pi v} + \frac{1}{2} e^{-\frac{\lambda_u}{v} l} \quad (2)$$

计算表明, 在中等气压(50 Torr 左右)、中等流速(50 m/s 或以下)(2)式中指数项影响并不大(详细讨论见后), 可以近似求得:

$$\sin \frac{\pi}{2l} x_m = \frac{2K \pm \sqrt{3K+1}}{4K+1} \quad (3)$$

式中 $K = \left(\frac{l\lambda_u}{\pi v}\right)^2$ 。(3)式中分子所含负号无物理意义。由(3)式得横流 CO₂ 激光器最佳光轴位置为:

$$x_m = \frac{2l}{\pi} \arcsin \left(\frac{2K + \sqrt{3K+1}}{4K+1} \right) \quad (4)$$

根据(4)式, 我们画出了顺流阳极长度

$l=5$ cm 时, 最佳光轴位置 x_m 与气压 p 及风速 v 的关系曲线(如图 2)。由图 2 可知, 气压 p 一定时, 最佳光轴位置 x_m 随风速 v 增加而增大; 风速 v 一定时, x_m 随气压 p 增加而减小。但一般情况下, x_m 并不等于阳极条顺流长度之中点 $x=2.5$ cm, 也并非增益之峰值位置。

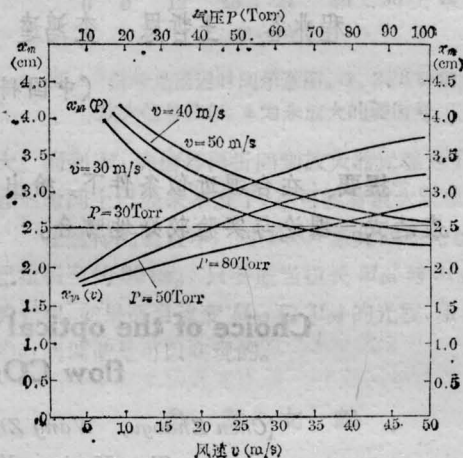


图 2 $l=5$ cm 时, 最佳光轴位置 x_m 与气压 p 及风速 v 的关系曲线 (CO₂:N₂:He=1:7:16)

三、横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴位置的实验确定

如果流速 v 等参量尚未测得, 我们也可以通过下列实验来确定横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴的最佳位置。

以通常采用的平凹镜腔为例(如图 3), 我们设初始光轴位置为 AC , 当凹面镜 R_1 (球心 O) 和平面输出镜 R_2 处于准直位置时, 测得输出激光功率为 P (放电电流为 I)。保持电流不变, 仔细调整输出耦合镜 R_2 之角度, 当转动角度为 θ_m 时, 输出激光功率为最大。

由图 3 可知, 新的振荡光轴为垂直于平面镜 R_2 (图中实线所绘) 并且过镜 R_1 球心 O 的直线 $A'O$ 。一般情况下, θ_m 不太大, 新光轴 $A'O$ 位置在腔镜尺寸允许的范围内, B 为

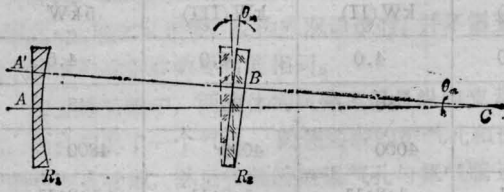


图3 横流 CO₂ 激光器谐振腔

新光轴 A'C 在腔片 R₂ 上的交点。设 B 点到原光轴 AC 的垂直距离为 Δ ，显然，

$$\Delta = (R - L)\theta_m \quad (5)$$

这里 R 为谐振腔(这里为平凹腔)凹面镜的曲率半径, L 为腔长。

如果 $\theta_m = 0$, 初始光轴 AC 即为最佳光轴。如果 θ_m 不为零, 仔细确定输出耦合镜 R₂ 的角度偏移方向, 移动光轴(平移)过 B 点(见图 3)且平行于原始光轴 AC (AC 平行于管-板电极之阴极)。不妨重复上述实验, 再次转动输出耦合镜 R₂, 检验新光轴是否为最佳光轴。

对于凹-凹型腔或凹-凸型腔也可以用上述方法来确定最佳光轴位置 x_m , 只是光轴位置应为腔镜 R₁、R₂ 之球心连线。

例如一台 1 kW 横流 CO₂ 激光器, 平凹型腔, 腔长 $L = 1430$ mm, 凹面镜曲率半径 $R = 7000$ mm, 流速 $v = 4000$ cm/s, 气压 $p = 60$ Torr (CO₂:N₂:He = 1:8:11), 阳极顺流长度 $l = 4$ cm。初始光轴位置 $(x, y) = (20.5, 17)$ (单位 mm, 下同), 当输出镜 R₂ (平镜) 及 R₁ 为准直位置时, 激光输出功率 600 W (放电电流 $I = 3$ A); 当输出镜 R₂ 向下游方向转动角度 $\theta_m \cong 0.001$ rad 时, 激光输出功率达最佳,

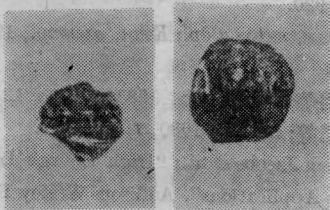


图4 1 kW 横流 CO₂ 激光器输出花样

左图: 输出镜 R₂ 处于准直角度;
右图: 输出镜 R₂ 向下游转动角度 θ_m

为 900 W, 而且激光输出花样也有明显改善(如图 4)。

由(5)式, $\Delta \cong 5$ mm, 表明新光轴要向下移动 5 mm, 即 $x_m \cong 25$ mm。实验表明, 当光轴位置移至 $x_m = 25$ mm 时, 在 R₁、R₂ 准直情况下, 激光输出为最佳。

在 5 kW 横流 CO₂ 激光器中, 我们得到完全类似的实验结果。同样为平凹腔, $L = 3230$ mm, $R = 7000$ mm, $v = 4800$ cm/s, $p = 45$ Torr (CO₂:N₂:He = 1:8:11), $l = 4.5$ cm。初始光轴位置为 $(x, y) = (26, 19)$, 当输出平镜 R₂ 及 R₁ 处于准直角度时, 激光输出功率为 3800 W ($I = 15$ A), 当调整 R₂ 角度(向下游) $\theta_m \cong 0.0016$ rad 时, 相同放电电流情况下, 激光输出功率为 4800 W。由(5)式, $\Delta \cong 6$ mm, 表明新光轴应该向下游平移 6 mm。当我们确立了新的激光轴 $(x, y) = (32, 19)$, R₂ 准直时, 输出功率达最佳。

上述二例表明, 上述实验确定横流 CO₂ 激光器谐振腔最佳光轴位置的方法是简便可行的。

四、近似公式(3)的实验验证及讨论

$$1. \text{ 公式(3) } \sin \frac{\pi}{2l} x_m = \frac{2K + \sqrt{3K + 1}}{4K + 1}$$

尽管是在近似条件下获得的, 但在多台横流 CO₂ 激光器中, 包括不同风速 v 、气压 p 和阳极顺流长度 l 情况下, 实验表明, 理论与实验较好地一致。下表给出了 4 台不同参量横流 CO₂ 激光器最佳光轴位置理论与实验结果。

2. 横流 CO₂ 激光器谐振腔光轴位置选择对激光输出功率和花样有明显影响。从(3)式可知, 最佳光轴位置 x_m 只与 $K = \left(\frac{l u_a}{\pi v}\right)^2$ 值有关。如 l 一定, x_m 只与 p/v 有关(气体比热也假定不变)。在某种情况下, 由于风机气动特性影响, 对同一台激光器, 气压 p 增大, 风速 v 随之增大, p/v 并无明显变化。所以即使气压改变, 谐振腔光轴位置并非一定要随

激 光 器 型 号		kW (I)	kW (II)	kW (III)	5kW
主 要 参 量	阳极顺流长度 l (cm)	4.0	4.0	4.0	4.5
	工作气压 p (Torr)	65	80	60	45
	气体流速 v (cm/s)	1800	4000	4000	4800
	气体比份 (CO ₂ :N ₂ :He)	1:8:11	1:8:11	1:8:11	1:8:11
最佳光轴位置 x_m (cm)	理 论 值	1.90	2.28	2.51	3.15
	实 验 值	1.90	2.00*	2.50	3.20
备 注	* 该实验数据可能有误差				

之变动。我们给出不同阳极条长度 l 情况下, x_m 随 p/v 变化之曲线(图 5)。利用此曲线, 当 l 、 p 、 v 已知时, 很易求得最佳光轴位置 x_m 。

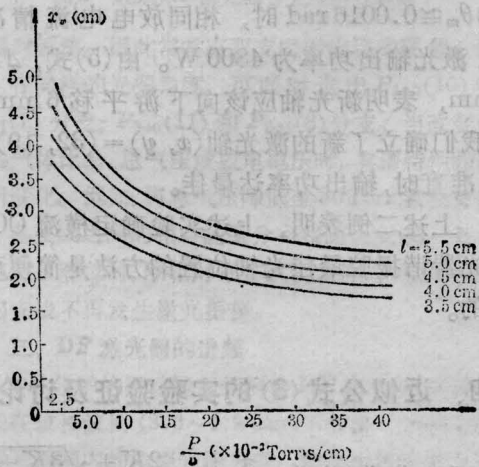


图 5 当 l 一定时, 最佳光轴位置 x_m 随 p/v 变化的曲线 (CO₂:N₂:He=1:7:16)

3. 在求解公式(3)的过程中, 我们使用了下列近似: ① 忽略了 $x > l$ 后的增益区 III (如图 1)。实际上, 在气压较高流速较小情况下(对应较大的 p/v 值), 如 $p=80$ Torr, $v=1800$ cm/s, $l=4$ cm, 计算表明 $x > l$ 之后的弛豫长度仅仅 0.5 cm。反之, 当 p/v 值较小, 如 $p=45$ Torr, $v=4800$ cm/s, $l=4.5$ cm, $x > l$ 之后的弛豫长度为 1.8 cm (理论计算值)。由此表明, 忽略 $x > l$ 之后增益部分对 p/v 值较大情况无明显影响, 而对 p/v 值较

小情况, 这种忽略会使 x_m 值偏小。

② 在解方程(2)时, 忽略了 e 指数项影响。我们比较了

$$\sin \frac{\pi}{2l} x_m = \frac{2K + \sqrt{3K + 1}}{4K + 1}$$

近似解与方程(2)的精确解, 我们发现 p/v 值大时, 二者相差甚微; 而对较小的 p/v 值, 近似值 x_m 比精确解大百分之几, 这种影响与忽略 $x > l$ 后增益部分的影响相抵消。

尽管(3)式是在较高气压、较低流速条件下求得的, 由于上述原因, 该公式也可延伸到较低气压、较高流速情况。

4. 如[3]指出的那样, 实际放电长度(顺流方向)并非严格等于阳极条顺流长度 l , 而随放电电流 I 加大而增大。本文未考虑放电电流对最佳光轴位置的影响。

参加本文实验工作的还有上海光机所横流 CO₂ 激光器组的吴东来、张宝富、陈平、江森、奚文龙等同志, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] A. B. Артамонов и др.; Кванто. элект. 1978, 5, № 4, 920.
- [2] Г. Абильситов и др.; Кван. электр., 1979, 6, № 1, 204.
- [3] 程兆谷等;《中国激光》, 1983, 10, No. 12, 821.
- [4] 王哲恩等;《激光》, 1980, 7, No. 7, 1.
- [5] Stephen Jacobs et al.; "High Energy Lasers and Their Applications", Addison-Wesley Publishing Company, 1974, p. 253.