

功率连续可调、高稳定度的 V 型 CO₂ 激光器

张新昌 孙孟嘉 郭崇健 林绅

摘 要

由于发展了气体电子学的并联放电稳定性理论,设计了带阻抗调节器的高稳定度气体激光管并联放电的激光电源系统,并考虑到反射镜热形变对谐振腔结构参数的影响,从而改进了谐振腔设计,实现了激光输出功率大范围可调、高稳定度的V形折迭式CO₂激光器。最高激光输出功率达160瓦,放电长度3米,比功率大于50瓦/米,稳定度为±3%,电光转换效率优于14%,发散角小于1.5毫弧度,光斑为低阶模,激光输出功率可由30瓦连续调到最佳值。整机具有较大的可靠性与通用性。

一、前 言

在连续波的激光器中,激光输出功率以CO₂分子气体激光器首屈一指。由于CO₂激光器功率大,在工业上可对金属或非金属材料进行切割、焊接、穿孔、熔炼、淬火、退火、刻划、表面处理等,成为一种有效的特种加工手段;在医疗上可用来破坏肿瘤,进行手术,治疗癌症等等,受到了人们的重视。

由于激光器的输出功率与激光管的放电长度成比例,如果所要求的激光输出功率越大,放电管(因而整个激光器)也就越长。例如一支一百五十瓦的直放电管的CO₂激光器长度达3—4米。长度过大在许多场合下是不方便的。为了获得较高的激光输出功率又不增加激光器的纵向尺寸,往往要把较长的放电管分解成为多根较短的支放电管,组成V形、N形、M形或者更为复杂的折迭式结构,这就构成了所谓的“折迭式CO₂激光器”

CO₂激光管由直放电管改成折迭式的放电管后,大大增加了器件的复杂性,相应地给光学谐振腔设计与激光器电源系统设计提出了需要解决的新的理论与实践问题。在光学谐振腔方面,除原来的两面反射镜外,为了折转腔内形成振荡的激光束,在每一折转点都得安装一面折转镜。折迭的次数越多,所需的腔镜数目也就越多,总的腔长就较大。光束在腔内多次折迭,如果每一反射镜只经历不大的热形变,对谐振腔结构参数的影响都可能很大,特别是为了降低器件成本而采用普通硬质玻璃做放电管、用普通光学玻璃作反射镜基底材料时,影响尤为突出。在设计激光谐振腔时需预先进行补偿。在激光器电源系统方面,通常的折迭式激光器有几根折迭的支放电管,就得用几套独立的高压直流电源对各支放电管分别供电,以避免各支激光放电管之间的相互影响。电源设备

• 1980年1月22日收到。

• 36 •

十分庞大, 功耗大, 整机效率低。而且难免因绝缘不良漏电使各支放电管形成不利的相互耦合。在这种电源系统中, 采用固定的限流电阻, 激光器的功率稳定度极低, 更难以实现并联的稳定放电。为了解决高稳定性与功率的大范围可调问题, 我们探讨了气体电子学的并联放电稳定性理论, 推导出了稳定性条件与稳定度系数, 指出了采用阻抗调节器的必要性。除了这两方面的问题之外, 通常的折迭式CO₂激光器要采用与石英玻璃热膨胀系数相近的特种钢材(殷钢)作激光支架, 以增加牢固性与稳定性。一台150瓦的激光器要用几百公斤特种钢材, 不仅价格昂贵, 而且十分笨重。如果热膨胀系数匹配不良, 一台调好的折迭式CO₂激光器过不多久, 就可能不出光。我们采用了适当的腔设计与简单的调节反射镜方法, 仅用轻金属支架或轻便的木质支架, 实现了激光器的高稳定、高可靠运转。激光最大输出功率大于160瓦, 稳定功率150瓦; 放电管总长三米, 比功率大于50瓦/米。激光器在八小时内的功率漂移为±3%, 电光效率优于14%; 发散角小于1.5毫弧度; 光斑为低阶模; 功率可调范围30瓦至160瓦。整机具有较大的可靠性与通用性。能适应不同功率水平工作的要求。现将其中关键的理论与设计问题总结于下:

二、气体激光管的并联放电稳定性理论

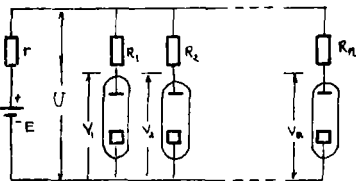
激光功率输出的稳定性是衡量激光器质量优劣的重要标志之一; 稳定性差将降低激光器的实用价值, 严重时甚至根本不能工作。常用的大多数原子和分子气体激光器都采用气体放电方式激励, 其激光功率输出的稳定性与在很大程度上决定于激光管放电参数(放电电流)的稳定性。因此, 研究气体激光放电参数的稳定性, 对于正确设计一台优质的激光器是十分重要的。

B. N. ΓAΠOHOB^[1]所指出的单支气体放电管放电的稳定性条件为:

$$(R+r)+R_{\sim}>0 \quad \dots (1)$$

式中 R 为放电电路的固定限流电阻, r 为电源内阻, R_{\sim} 为气体放电管的动态阻抗, 它是伏安特性曲线的微商。对于正常辉光放电的激光管, 因伏安特性具有下降特性, $R_{\sim}<0$ 这一条件并不能用来解决多根激光管并联放电的稳定性问题。因此, 需要进一步发展并联放电稳定性理论。

设有如图一所示的几支气体激光管并联放电, 其伏安特性与直流负载线方程分别为:



(图一) 采用固定限流电阻的几支气体激光管并联放电电路

- E—电源电压,
- U—支路端电压,
- $V_1, V_2 \dots V_n$ —激光管上电压。
- $R_1, R_2 \dots R_n$ —各支路固定限流电阻。
- R_{\sim} —激光管动态阻抗,
- R_{\sim} —激光管直流阻抗。

$$\begin{cases} V_1 = f_1(I_1) \\ V_2 = f_2(I_2) \\ \vdots \\ V_n = f_n(I_n) \end{cases} \quad \dots (2)$$

$$\begin{cases} V_1 = E - (I_1 + I_2 + \dots + I_n)r - I_1 R_1 \\ V_2 = E - (I_1 + I_2 + \dots + I_n)r - I_2 R_2 \dots (3) \\ \vdots \\ V_n = E - (I_1 + I_2 + \dots + I_n)r - I_n R_n \end{cases}$$

现讨论其中任一激光管(例如第一支)的放电稳定

性条件。设由于某种原因，管1电流有起伏，增量为 ΔI ，通过电源的耦合，支路端电压改变 $\Delta U = -r\Delta I_1$ 。 ΔU 将使其它各激光放电管电流分别减小 $\Delta I_2, \Delta I_3, \dots, \Delta I_n$ 。

$$\begin{cases} \Delta I_2 = \frac{\Delta U}{R_2 + R_{\sim 2}} = -\frac{r}{R_2 + R_{\sim 2}} \Delta I_1 \\ \Delta I_3 = \frac{\Delta U}{R_3 + R_{\sim 3}} = -\frac{r}{R_3 + R_{\sim 3}} \Delta I_1 \\ \vdots \\ \Delta I_n = \frac{\Delta U}{R_n + R_{\sim n}} = -\frac{r}{R_n + R_{\sim n}} \Delta I_1 \end{cases} \quad \dots (4)$$

这些电流的减小又会使电压 U 回升 $\Delta U'$

$$\Delta U' = -(\Delta I_2 + \dots + \Delta I_n)I = \Delta I_1 \left(\frac{1}{R_2 + R_{\sim 2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{\sim n}} \right) r^2$$

$\Delta U'$ 反过来又会使 I_1 增加 $\Delta I'$

$$\Delta I' = \frac{\Delta U'}{R_1 + R_{\sim 1}} = \frac{\Delta I_1}{R_1 + R_{\sim 1}} \left(\frac{1}{R_2 + R_{\sim 2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{\sim n}} \right) r^2$$

如果 $\Delta I_1 < \Delta I'$ ，则管1的放电必将是稳定的，于是稳性条件为：

$$\frac{1}{R_1 + R_{\sim 1}} \left(\frac{1}{R_2 + R_{\sim 2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{\sim n}} \right) r^2 < 1 \quad \dots (5)$$

其中 $\frac{1}{R_1 + R_{\sim 1}}$ 是支路的电导，括号中各项之和是其它各支路的并联电导。如果各激光放电管情况完全相同， $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ ； $R_{\sim 1} = R_{\sim 2} = \dots = R_{\sim n} = R_{\sim}$ ，则上式可写成：

$$R + R_{\sim} > \sqrt{n-1} r^2 \quad \dots (5)'$$

这就是各放电管支路采用固定限流电阻时放电的稳定性条件。由这一稳定性条件尚不能给出放电的稳定程度，必须定义放电的稳定度。而只有从对于电源电压的相对改变 $\frac{\Delta E}{E}$ 来考虑放电电流的变化 $\frac{\Delta I}{I}$ ，定义的稳定度概念才有实际的意义。为此，由(3)

式微分得出

$$df_1(I_1) = dE - (dI_1 + dI_2 + \dots + dI_n)r - dI_1 R_1$$

$$R_{\sim 1} = \frac{df_1(I_1)}{dI_1} = \frac{dE}{dI_1} - \left(1 + \frac{dI_2}{dI_1} + \dots + \frac{dI_n}{dI_1} \right) r - R_1$$

$$\frac{dE}{dI_1} = R_{\sim 1} + R_1 + \left(1 + \frac{dI_2}{dI_1} + \dots + \frac{dI_n}{dI_1} \right) r$$

$$\frac{dI_1}{I_1} / \frac{dE}{E} = \frac{E}{I_1} \cdot \frac{1}{R_{\sim 1} + R_1 + \left[1 + \frac{dI_2}{dI_1} + \dots + \frac{dI_n}{dI_1} \right] r}$$

利用 I_2, \dots, I_n 对 I_1 的微分关系式，并考虑各管完全相同，则

$$\frac{dI_1}{I_1} / \frac{dE}{E} = \frac{nE}{I} \cdot \frac{1}{R_- + R + \left[1 - \frac{(n-1)r}{R+R_-}\right]r}$$

$$= \frac{nR_a}{R_- + R + \left[1 - \frac{(n-1)r}{R+R_-}\right]r}$$

其中 $R_a = r + \frac{1}{n}$, $(R+R_-)$ 为电路的总直流阻抗。令稳定度为 S : $\frac{1}{S} = \frac{dI_1}{I_1} / \frac{dE}{E}$

则得
$$S = \frac{R_- + R + \left[1 - \frac{(n-1)r}{R+R_-}\right]r}{nR_a + R + R_-} \quad \dots (6)$$

因 $R_- < R_-$, 故稳定度 S 恒小于 1。可见在这种电路中, 放电稳定性是极差的。

为了使激光管的并联放电获得高的稳定度, 必须要求稳定度系数 $S > 1$ 或 $S \gg 1$ 。显然, 各激光管支路串接的不应是固定的限流电阻, 而应是一个阻抗元件, 该元件的阻抗可随激光管放电电流的改变而自动调整; 该元件的直流阻抗为 \bar{R} , 动态阻抗为 \tilde{R} , \tilde{R} 为正值且需满足 $\tilde{R} \gg \bar{R}$, 则

$$S = \frac{R_- + \tilde{R} + \left[1 - \frac{(n-1)r}{\tilde{R} + R_-}\right]r}{nr + \bar{R} + R_-} \gg 1 \quad \dots (7)$$

从而保证了激光管的高稳定度的放电。

在 V 形成折迭的激光放电管的条件下, 并联放电的稳定性条件可写为

$$(R+R_-) > r \quad \dots (5)'$$

稳定度
$$S = \frac{R_- + R + r - r^2 / (R+R_-)}{R + R_- + 2r} \quad \dots (7)'$$

讨论: 1. 在单管放电时,
$$S = \frac{R_- + R + r}{R_- + R + r} \quad \dots (7)''$$

当 $r \rightarrow \infty$ 时, $S \rightarrow 1$ 表明这时的电源内阻越大越好, 即电源应是一个恒流源 (r 大); 然而, 在并联放电时有原则上的不同, 电源内阻 r 越小越好; 当 $r \rightarrow 0$ 时, $S \rightarrow \frac{R_- + R}{R_- + R} < 1$,

电源应是一个恒压源 (r 小)。无论是单管放电或是两管并联放电, 在采用固定限流电阻时, 最多也只能达到 $S < 1$ 或 $S \rightarrow 1$ 的稳定度。要想使 $S \gg 1$, 唯一的方法是把固定限流电阻变为阻抗元件。

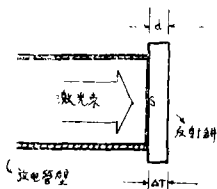
2. 气体放电是一个繁流增长过程, 在引燃后, 放电电流迅速由小增大。在并联放电的情形下, 由于电源内阻的耦合作用, 要形成稳定的并联放电, 不单要求两支激光放电管的工作点满足稳定性条件 (5)' 式, 而且要求在电流增长的过程中始终满足这一条件。放电电流小时, 由于激光放电管的动态阻抗 R_- 的绝对值很大, 如各支路中用固定的限流电阻, 上述放电稳定性条件很可能被破坏, 极易形成只有一支激光放电管。因此, 多管并联放电电源的设计的重点应放在小电流状态下能满足稳定性条件。采用辅助

电源通过大阻值电阻使激光管预放电是必要和有效的。

M. J. Posakony^[2]用真空三极管与晶体管组合的阻抗调节器。我们则认为，三极管正动态阻抗不大，不是最佳组合。真空四极管本身的正动态阻抗值极大，以它作阻抗元件甚至略去晶体管部份都能使放电具有很高的稳定度。四极管的动态范围也很大，激光管放电电流几乎可由零调到最佳值都十分稳定。在折迭式CO₂激光器中，为了获得高稳定的模式与光斑大小，须稳定激光输出功率，用高稳定度与高可调性的激光电源是十分必要的。有关这种电源的具体设计可参阅“功率连续可调的折迭式CO₂激光电源系统”一文^[3]。

三、反射镜热形变对折迭式谐振腔腔结构参数的影响

随着激光器腔内功率（与输出功率）的增大，由于反射镜吸收损耗而产生的反射镜热形变问题变得越来越突出，成为不可忽视的影响激光器谐振腔参数的重要因素。特别是在折迭式的激光谐振腔中，光线在腔内多次折迭，对于腔内光束的每一个往返来说，折转镜要经历两次反射与吸收，热形变尤甚，谐振腔参数的变化比直腔更为显著，甚至可能完全破坏原来的谐振腔腔型设计，必须加以考虑。



(图二) 反射镜吸收激光能量后在内外表面之间建立温度梯度。

设有如图二所示的反射镜，反射率为 r ，厚度为 d ，面积为 S ；又设激光腔内功率为 P 。可以近似地认为，反射镜内表面在单位时间内吸收的热能为 $P(1-r)$ 。如果反射镜外表面用水冷却而保持温度恒定，忽略由管壁的热传导带走的一小部份热量，在热传动平衡条件下，于反射镜内外表面之间建立一温度梯度，平均温差为 ΔT ，而反射镜内表面在单位时间内由腔内吸收的能量应等于单位时间内通过镜片的热传导传走的热量。利用热传导方程写出：^[4]

$$P(1-r) = 4.18 \beta \left(-\frac{\partial T}{\partial x} \right) S \quad \dots (8)$$

其中 β 是反射镜基底材料的热传导系数（对玻璃 $\beta = 0.0018 - 0.0022$ 卡/厘米·秒·度，我们取 $\beta = 0.002$ 卡/厘米·秒·度来估算）； $\frac{\partial T}{\partial x}$ 是 x 方向上的温度梯度，近似地有 $\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{\Delta T}{d}$ 。代入上式后求得

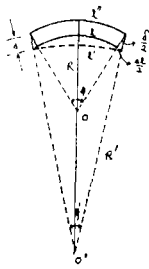
$$\Delta T = \frac{P(1-r)d}{4.18 \times 0.002S} = 120P(1-r) \frac{d}{S} \quad \dots (9)$$

对折转镜来说，因吸收的功率要以 $2P(1-r)$ 计，相应的温度梯度要比非折转镜大：

$$\Delta T = 240P(1-r) \frac{d}{S} \quad \dots (9)'$$

因而相应的热形变也将较大。

现在考虑反射镜的热形变。设有如图三所示的反射镜，是曲率半径为 R 的凹面镜。我们在轴上从曲率中心 O 点向镜片任意作两矢径，夹角为 φ 。设反射镜外表面所对应的线度恒定，内表面线度由于吸收光能提高了温度由 l 变为 l' ， $l' = l(1 + \alpha \Delta T)$ ， α 是玻



(图三) 反射镜的热形变
 O—曲率中心
 O'—新曲率中心
 R—原曲率半径
 R'—新曲率半径
 l—内表面线度
 l'—形变后内表面线度
 l''—外表面线度
 d—镜片厚度

璃的热膨胀系数, 近似取为 $\alpha = 10^{-5}$ 度⁻¹。形变后的新曲率半径为 R' , 曲率中心移至 O' , 与镜片的张角变为 φ' 。由几何关系:

$$\frac{\delta}{2} = \frac{\Delta l}{2} / d = \frac{l\alpha\Delta T}{2d}$$

$$\varphi' = \varphi - \delta = \frac{l}{R} - l\alpha\frac{\Delta T}{d} = l\left(\frac{1}{R} - \alpha\frac{\Delta T}{d}\right)$$

于是:
$$R' = \frac{l(1 + \alpha\Delta T)}{\varphi'} \approx \frac{Rd}{d - R\alpha\Delta T} \quad \dots (10)$$

如果反射镜原是平片 $R = \infty$, 则上式变成

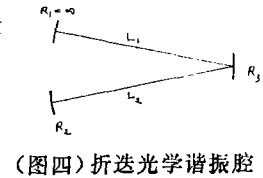
$$R' \approx -d/\alpha\Delta T \quad \dots (10)'$$

负号表示平面镜变成了凸面镜; 如果反射镜原是凹面镜, 则可能变为曲率半径较大的凹面镜 $R' > R$; 如果热形变更为剧烈, 有可能使凹面镜变成平面镜 $R' = \infty$, 甚至变为凸面镜 $R' < 0$ 。

对于如图四所示的 V 形折迭光学谐振腔, 可视为腔内具有焦距为 f 的薄透镜的等效二镜直腔, $f = R_3/2$ 。

G. Grau 关于激光谐振腔的文章中指出, [5] 腔内具有薄透镜的等效二镜腔的腔结构参数为:

$$N = \frac{a_1 a_2'}{L_e \lambda} = \frac{a_1 a_2}{\lambda \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right)} = \frac{a^2}{2\lambda L \left(1 - \frac{L}{R_3} \right)} \quad \dots (11)$$



(图四) 折迭光学谐振腔

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{a_1}{a_2'} \left(1 - \frac{L'}{R_1} \right) = \frac{a_1}{a_2} \left[1 - \frac{L_2}{f} - \frac{1}{R_1} \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right) \right] \\ &= \frac{a_1}{a_2} \left[1 - \frac{2L}{R_3} - \frac{2L}{R_1} \left(1 - \frac{L}{R_3} \right) \right] \\ &= \frac{a_1}{a_2} \left(1 - \frac{2L}{R_3} \right) = 1 - \frac{2L}{R_3} \quad \dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_2 &= \frac{a_2'}{a_1} \left(1 - \frac{L'}{R_2} \right) = \frac{a_2}{a_1} \left[1 - \frac{L_1}{f} - \frac{1}{R_2} \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right) \right] \\ &= \frac{a_2}{a_1} \left[1 - \frac{2L}{R_3} - \frac{2L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{R_3} \right) \right] \\ &= 1 - \frac{2L}{R_3} - \frac{2L}{R_2} \left(1 - \frac{L}{R_3} \right) \quad \dots (13) \end{aligned}$$

其中 L_e 为等效腔长, a_2' 是等效腔镜半径, $L_1 = L_2 = L$, $R_1 = \infty$, 一般 $a_1 = a_2 = a$ 。

我们要指出, 一个谐振腔的空腔与工作腔是不同的。当上述折迭谐振腔由空谐变成工作腔之后, 等效腔的腔结构参数因反射镜热变形而发生变化

$$N' = \frac{a^2}{2\lambda L(1-L/R_3')} \quad \dots (11)'$$

$$G_1' = 1 - 2L/R_3' \quad \dots (12)'$$

$$G_2' = 1 - \frac{2L}{R_3'} - \frac{2L}{R_2'} \left(1 - \frac{L}{R_3'}\right) \quad \dots (13)'$$

考虑到腔内功率与激光输出功率的关系, (9) 式可写成:

$$\Delta T = 120(1-r) \frac{d}{St} W \quad \dots (9)'$$

对于折转镜 $\Delta T = 240(1-r) \frac{d}{St} W \quad \dots (9)''$

其中 t 是输出窗的透射率。在我们研制的 V 形折迭激光器中, 输出窗 $R_1 = \infty$, 它的热变形很小, 可忽略不计。利用 (9)' 与 (9)'' 式, 经过简单的运算, 得

$$N' = \frac{a^2}{2\lambda L \left[\left(1 - \frac{L}{R_3'}\right) + 2FLW \right]} \quad \dots (11)''$$

$$G_1' = \left(1 - \frac{2L}{R_3'}\right) + 4FLW = G_1 + 4FLW \quad \dots (12)''$$

$$\begin{aligned} G_2' &= \left[\left(1 - \frac{2L}{R_3'}\right) - \frac{2L}{R_2'} \left(1 - \frac{L}{R_3'}\right) \right] + 2LF \left[\left(1 - \frac{2L}{R_2'}\right) - \frac{L}{R_3'} \right] W + 4F^2 L^2 W^2 \\ &= G_2 + 2LF \left[\left(1 - \frac{2L}{R_2'}\right) - \frac{L}{R_3'} \right] W + 4F^2 L^2 W^2 \quad \dots (13)'' \end{aligned}$$

由此可见, 经历反射镜热 V 形变的形折迭腔的腔结构参数是激光输出功率的函数。

讨论: 1. 在经历反射镜热形变的工作腔中, 腔模表示为:

$$\frac{4L}{\lambda_{mng}} = q + \frac{1}{\pi} (m+n+1) \cos^{-1} \sqrt{G_1' G_2'} \quad \dots (15)$$

腔模与乘积 $G_1' G_2'$ 有关, 即与 W^3 有关。

2. 等效输出镜上光斑大小为:

$$\omega_1' = \sqrt{\frac{L_c' \lambda}{\pi}} \left[\frac{G_2'}{G_1' (1 - G_1' G_2')} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \dots (16)$$

其中 L_c' 为谐振腔经历热形变后的等效腔长:

$$L_c' = 2L \left(1 - \frac{L}{R_3'}\right) = 2L \left(1 - \frac{L}{R_3'}\right) + L_2 FW = L_c + 4L^2 FW \quad \dots (17)$$

故 ω_1' 也是激光输出功率的函数 (W 的上升函数)。当采用稳定激光输出功率措施时, 模斑大小可十分稳定。

3. 反射镜的热形变总是使折迭腔的腔结构参数增长。因此, 一个会聚

不足的稳定空腔,如果设计在稳定性条件的边界附近,反射镜的形变完全可能使一个稳定腔变成一个非稳定腔;反之,一个过份会聚的谐振腔空腔是非稳定腔,它设计在稳定性条件的边界附近,反射镜的热形变可能使一个非稳的空腔热演变成一个稳定的工作腔。根据 $G_1'G_2' = 1$, $G_1'G_2' = 0$ 通过解 W 的高次代数方程(三次),可给出演变的临界功率,它可以作为该谐振腔在所设计的激光输出功率下能否实现上述热演变的判据。

在具体设计谐振腔时,也可根据所要求的激光输出功率、使用的反射镜、放电管截面(镜面面积)等情况,计算每一反射镜的 $\angle T$ 以及相应的新曲率半径,直接得出 $G_1'G_2'$ 的值。在图四中,若 $R_1 = R_3 = \infty$, $R_2 = 10$ 米, $G_1G_2 = 0.6$, 空腔是稳定腔。但在 $G_1'G_2'$ 假定功率为150瓦时,已达 $1.10 > 1$, 工作腔变成非稳腔;若 $R_1 = \infty$, $R_2 = 10$ 米, $R_3 = 5$ 米, $G_1G_2 = -0.008 < 0$, 空腔是非稳定腔,但 $G_1'G_2' = 0.005 > 0$, 故工作腔变成稳定腔。如果镜面吸收损耗较大,则 $R_1 = R_2 = \infty$, $R_3 = 10$ 米情形亦能由稳定腔变成不稳腔。

4. 由(11)"式看出,在给定腔长与给定功率情况下, V 形折迭光学谐振腔的费涅尔数 N' 与折转镜的曲率半径 R_3 的关系极大。折转镜是平镜、凸镜或会聚不足的凹面镜都不能得到较大的费涅尔数,腔的衍射损耗较大。由(11)"式可解出折转镜的曲率半径

$$R_3 = \frac{2\lambda L^2 N'}{2\lambda L N' (1 + 2FW) - a^2 L} \quad \dots (18)$$

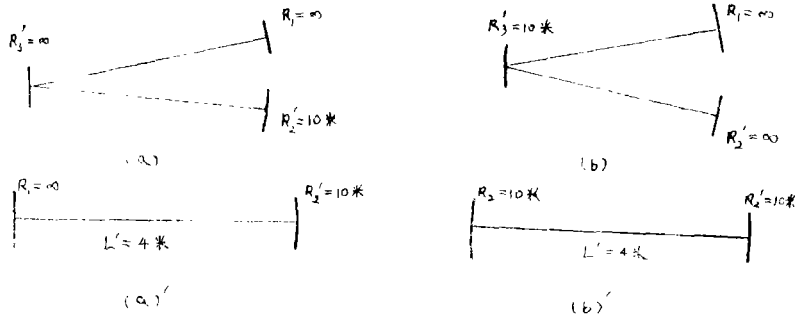
若取 $N' = 3.4$, 并设所要求的激光输出功率为 150 瓦, 则 R_3 应取 5 米。

当我们取 $R_1 = \infty$, $R_2 = 10$ 米, $R_3 = 5$ 米时,考虑到实际的反射镜总有一些倾斜,在 $N' = 3.4$ 这样大的费涅尔数下, TEM_{00} 模的损耗明显增大,甚至超过 TEM_{00} 模的损耗;同时,考虑到 G' 参数在共焦点附近变化时,将对 TEM_{00} 模产生较大的影响(损耗增加),而对 TEM_{00} 模影响不大,故在这种腔设计下, TEM_{10} 模将首先起振,抑制了模。但是,如果减小放电管的半径,使费涅尔数 N' 减小,将对 TEM_{10} 模产生较大的损耗,从而抑止其振荡,可能获得 TEM_{00} 模。〔6〕

四、谐振腔腔型设计的一些考虑

从增大激光输出功率的角度来考虑,光学谐振腔的设计应具有尽可能大的模体积。在不要求单模的场合,应具有尽可能大的多模模体积;另一方面,由于影响折迭式激光腔的因素很多(除了反射镜的热形变外,环境温度的变化可能影响激光支架与激光管的配合,从而使光腔畸变),为了保证激光器工作的稳定性,光学谐振腔的设计应尽可能减低对调整精度的要求。从前者来看,须采用大曲率半径的反射镜片;从后者来看,须用小曲率半径的反射镜。两者的要求相矛盾。因此,对于给定的一组反射镜片来说,应作合理的安排,尽量使二者得到兼顾。我们通过下面的具体例子来说明之:

在一个每折迭长 2 米的 V 形 CO_2 激光器中,输出窗是锗平片,不受热形变, $R_1 = \infty$; 其它两个反射镜在经历热形变后,分别成为 $R' = \infty$ 和 $R' = 10$ 米的反射镜。那么,可能的安排有两种情形(见图五(a)(b))



(图五) V形折迭谐振腔的反射镜的两种组合及其等效二镜直腔

由计算可知, 对于图五(a) ($R_1 = R_3' = \infty$, $R_2' = 10$ 米), 各反射镜上的单模光斑大小分别为: $\omega_1' = 3.94$ 毫米、 $\omega_2' = 5.1$ 毫米, $\omega_3' = 4.26$ 毫米; 而对于图五(b) 的情况 ($R_1 = R_2' = \infty$, $R_3' = 10$ 米), $\omega_1 = \omega_2' = 3.56$ 毫米, $\omega_3' = 3.98$ 毫米。显然就单模模体积来说, (a) 比 (b) 大约 1.4 倍。可是对我们所选择的放电管内半径 11 毫米来说, 在 (a) 情形下, TEM₀₁ 模是允许的, 因为最大光斑 $\omega_2' = \sqrt{3} \times 5.1$ 毫米 ≈ 8.83 毫米 < 11 毫米; 而对 TEM₀₂ (或 TEM₁₁) 模来说, 最大光斑 $\omega_2' = \sqrt{5} \times 5.1$ 毫米 ≈ 11.4 毫米 > 11 毫米, 故是不允许的。因此, 在 (a) 情形下所能出现的最高阶模是 TEM₀₁ 模; 但在 (b) 情形下, 因为最大光斑 $\omega_3' = \sqrt{5} \times 3.98$ 毫米 = 8.9 毫米 < 11 毫米, TEM₀₂ 模的出现却是可能的。比较上述两种情况: (a) TEM₀₁ $\omega_1 = 6.82$ 毫米、 $\omega_2' = 8.83$ 毫米、 $\omega_3' = 7.4$ 毫米
(b) TEM₀₂ $\omega_1 = 7.9$ 毫米、 $\omega_2' = 7.9$ 毫米、 $\omega_3' = 8.9$ 毫米
尽管单模体积 (a) 比 (b) 大, 但 (b) 可能出现的高阶模 TEM₀₂ 的模体积大于 (a) 可能出现的高阶模 TEM₀₁ 的模体积 (1.15 倍)。

现在再来比较上述两种情况对于反射镜调整精度的要求。方法是: 考虑到平面镜只起折光作用, 对光束特性不发生影响, 可以把谐振腔等效为如图五的简单二镜直腔。图中 (a)' 和 (b)' 其中一个镜片 (输出窗 R_1) 假设位置是正确的, 讨论在给定管半径 a 的条件下另一反射镜的允许角偏差: [6]

$$(a)': \text{ 最大允许角偏差 } \theta_{ma}' = \frac{a - \omega_2'}{R_2'} \quad \dots (19)$$

$$(b)': \text{ 最大允许角偏差 } \theta_{mb}' = \frac{(a - \omega_3')(2R_3' - L')}{R_3'^2} \quad \dots (20)$$

例如, 设 $a = 11$ 毫米, $R_2' = 10$ 米, $R_3' = 10$ 米, $L' = 4$ 米。

对于 TEM₀₁ 模: (a) $\omega_2' = 3.83$ 毫米, $\theta_{ma}' = \frac{11 - 3.83}{10000}$ 弧度

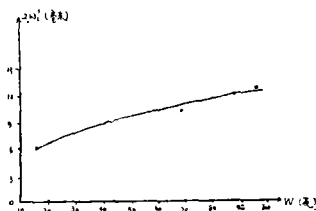
对于 TEM₀₂ 模: (b) $\omega_3' = 8.9$ 毫米, $\theta_{mb}' = \frac{1.6 \times (11 - 8.9)}{10000}$ 弧度 = 1'5"

由此可见, 当折迭式激光器的折转镜采用凹面镜时, 可能出现的多模模体积比用平面镜要大, 而且对调整精度的要求也降低了 (允许的角偏差增大了), 这对于保证激光器的稳定工作是有益的。这一讨论与上述关于费涅尔数的分析是一致的。

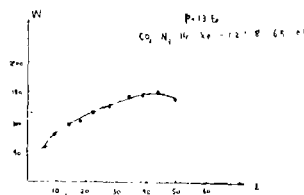
五、实验与结论

我们设计的V形折迭CO₂激光器， $a=11$ 毫米， $R_3=5$ 米， $R_2=10$ 米， $R_1=\infty$ ， $L=2$ 米，放电长度为3米。实验结果为：

1. 激光输出光斑确是激光输出功率的上升函数（见图六）



（图六）激光输出光斑大小随功率的变化。

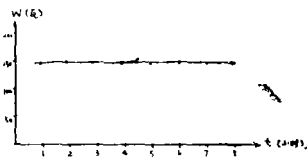


（图七）激光输出功率随电流的变化

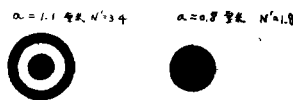
2. 激光输出功率随放电电流的变化见图七。在图中的气体配比下，最佳功率为150瓦，若气体配比为CO₂:N₂:He:Xe=1:2:8:0.5并加适量水汽，最佳功率大于160瓦。

3. 激光输出功率随时间变化的实验曲线见图八。功率漂移在八小时内为±3%

4. 激光输出模式，如图九所示，证明是低阶模TME₁₀与TME₀₀。



（图八）激光输出功率随时间的变化



（图九）激光输出模式

结论：上述实验结果与理论分析一致，说明在设计激光谐振腔时，考虑到热形变对谐振腔参数的影响，有必要预先进行补偿；同时，也说明在折迭式CO₂激光器中采用高稳定度与高可调性的并联放电的激光电源来严格稳定输出功率是必要和有效的。

致谢：邹立保，戚伯荪，许新民等同志为这台激光器做了不少工作，特致谢意。

参 考 文 献

- 〔1〕 Б.И.ГАПОНОВ, Электроника, Часть II, p.453.
- 〔2〕 M.J.Posakony, Rev. Sci. Instr., 1972, 43, No.2, 270—273.
- 〔3〕 张新昌、孙孟嘉, “激光”, 1979, 4, p.56.
- 〔4〕 Jean Rossel, “Physique Générale”
〔“ОБЩАЯ ФИЗИКА”, СТР. 322, 1964,
- 〔5〕 W.Kleen, R.Müller, G.Grau et al.
“LASER” p.77 “Springer-Verlag”, Berlin, 1969.
- 〔6〕 “固体激光导论” p.229—234, 上海人民出版社, 1975.
- 〔7〕 “气体激光” (上册), p.87, 上海人民出版社, 1975.