

腔镜镜面变形和角向偏折对共焦非稳腔输出特性的影响

程 祖 海

(华中工学院激光研究所)

提要: 本文分析和实验研究了腔镜镜面变形和角向偏折对共焦非稳腔输出光束近场图样及其横向强度分布的影响。推导出了凸面镜失调时失调临界角 $\theta_{\text{临}}$ 的数学方程。利用此方程计算所得的 HGL-84 型横流电激励 CO_2 激光器正支共焦非稳腔的 $\theta_{\text{临}}$ 值, 与实验数据和失调光斑图样能很好地吻合。

Effect of deformation and angular deflection of resonant mirrors on output characteristics of an unstable confocal resonator

Cheng Zuhai

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The effect of deformation and angular deflection of resonant mirrors on the output characteristics of an unstable confocal resonator are analysed and studied experimentally. The equations of the critical angle of the convex mirror are derived. The theoretical and experimental results are in good agreement.

一、引 言

非稳腔以其大的横模体积、良好的选模能力和输出准直平行光束等优点受到人们的重视。其主要弊病是对光腔的稳定性和调节灵敏度要求甚高。实际工作的非稳腔,特别是在高功率输出条件下工作时,镜面变形和腔镜失调都将有可能使非稳腔的输出功率和近场光斑图样等发生变化。本文的目的在于

分析这些因素的影响机理及其数量,找出其主要影响因素及相应的解决办法。

二、腔镜镜面变形的影响

如图 1 所示,正支共焦非稳腔主要由凸面镜 M_2 , 凹面镜 M_1 和输出耦合镜 M_3 三面镀金的全反射铜镜组成。典型的光腔参量为凹面镜和凸面镜的曲率半径 R_1 和 R_2 , 腔长

收稿日期: 1985年6月10日。

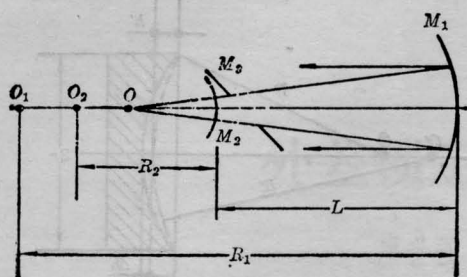


图1 正支共焦非稳腔结构示意图

L 以及输出耦合镜内孔直径 d 。在精确校准状态下稳定工作的非稳腔, 满足 $R_1 + R_2 = 2L$ 的共焦条件, 输出光斑近场图样为强度均匀分布的平面圆环。如果工作过程中这些光腔参量中的一个或几个发生变化, 激光器的输出功率、振荡模式也随之发生改变。

由于非稳腔一般具有较大的腔长, 特别是在高功率器件使用时, L 一般大于 1m 。因此腔长的小量对称伸长变形对非稳腔的工作稳定性的影响很不敏感。反之腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径 R_1 和 R_2 的几何形状误差和动态变形对输出特性的影响却不能忽略。分析表明, 在保证腔镜镜面边缘与其中心的几何偏差 Δ 在 $(\Delta/\lambda) < \frac{1}{16}\lambda$ 的加工精度条件下, 镜面的球形畸变公差对输出耦合率 δ 和输出光斑近场图样不会产生多大的影响^[1], 因而腔镜镜面曲率半径的动态变形成为腔镜镜面变形的主要因素。腔镜镜面曲率半径 R_1 和 R_2 的动态变形主要来自两个方面: 一是在高功率激光照射下的腔镜吸收热变形; 二是因通水冷却造成的镜面两端面承受的真空与水压之间的压力变形。这两种变形的总趋势将使凹面镜的 R_1 趋向增大, 凸面镜的 R_2 趋向减小。变形的结果, 通过非稳腔几何放大率 $M = R_1/R_2$ 的改变, 影响到等效非涅耳数 N_{eq} :

$$N_{eq} = \frac{M-1}{2} \cdot \frac{a^2}{\lambda L} \quad (1)$$

和输出耦合率 δ ^[2]

$$\left(\frac{M^2-1}{M^2}\right)^2 \approx \begin{cases} 1.44\delta - 0.44\delta^2 & (N_{eq} = \frac{1}{2}) \\ 1.06\delta - 0.06\delta^2 & (N_{eq} = 3/2) \\ \delta & (N_{eq} \geq 5/2) \end{cases} \quad (2)$$

发生变化。等效非涅耳数 N_{eq} 是决定腔内振荡模式结构的关键因素, 且当 N_{eq} 为半奇数时, 非稳腔有最好的横模选择, 最低阶模的衍射损失最小, 易于优先振荡。如果非稳腔的设计要求和精确校准状态因腔镜镜面变形而遭到破坏, 则最低阶模振荡条件和输出耦合率 δ 就可能发生改变, 导致输出功率和横向模式分布的变化。

我们利用图2所示的干涉实验装置, 采用 He-Ne 激光器作干涉光源, 测量了腔镜压力变形和热变形的数值大小。镜面静态时, 调节 l_1 或 l_2 , 使干涉屏上出现稳定清晰的干涉圆环图样。当腔镜加压和强激光束照射时, 由于镜面表面的变形, l_1 的大小会发生微小的改变, 表现在干涉图样上为中心亮(暗)点交替地吞进(l_1 变小, 镜面外凸)或吐出(l_1 变大, 镜面内凹), 且当 $\Delta l = \frac{1}{2}\lambda$ 时, 中心亮(暗)点交替变换一次。实验测得物理直径为 $\phi 60\text{mm}$ 的平面镜中心和边缘的压力变形

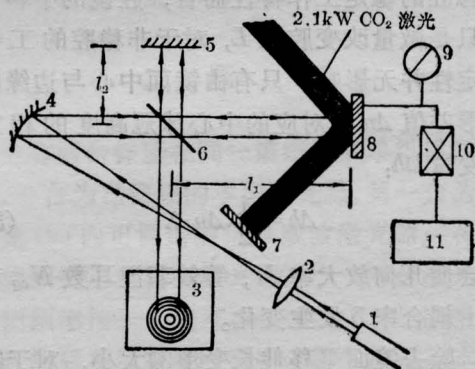


图2 腔镜压力变形和热变形测试装置原理图

1—He-Ne 激光器; 2—透镜; 3—干涉屏; 4—全反凹面镜; 5—平面全反镜; 6—半透半反镜; 7—档光耐火砖; 8—待测腔镜; 9—气压表; 10—调节阀; 11—压气机

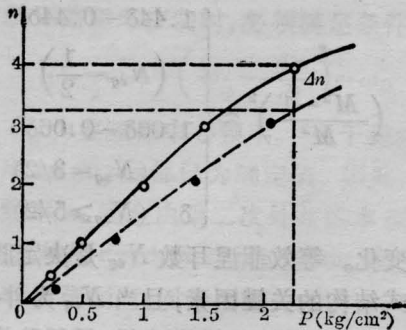


图3 $\phi 60$ 平面镜在不同工作气压下的变形
实线: 镜面中心, 虚线: 镜面边缘

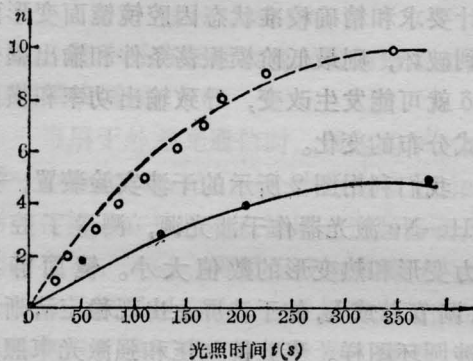


图4 $\phi 90$ 凹面镜在通水冷却和 2.1 kW 激光照射下的变形

实线: 监测点距镜面中心 25 mm, 虚线: 镜面中心

以及物理直径为 $\phi 90$ mm 的凹面镜压力变形和热变形的大小如图 3、图 4 所示。

从图 3 和图 4 中可以看出, 在镜面变形时, 镜面中心和边缘同时发生了变化。对于非稳腔的稳定工作特性而言, 腔镜的平移伸长只是微量改变腔长 L , 对于非稳腔的工作稳定性并无影响。只有由镜面中心与边缘的变形差值 Δn 所对应的中心球冠高度的改变量 Δh :

$$\Delta h = \frac{1}{2} \Delta n \cdot \lambda \quad (3)$$

才会使几何放大率 M , 等效菲涅耳数 N_{eq} 和输出耦合率 δ 发生变化。

除去镜面平移伸长变形的大小, 对于物理半径为 r 的球面镜, 其中心球冠高度 h 为:

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (4)$$

当镜面压力变形和热变形后, 球冠高度改变了 Δh , 如图 5 所示。则变形后的球冠高度 h'

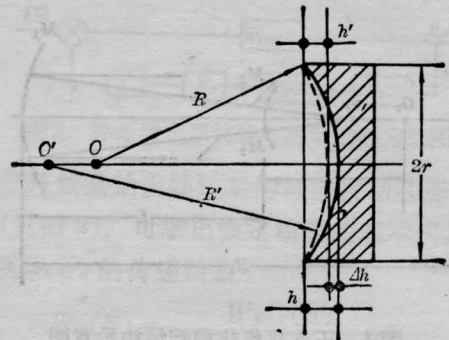


图5 凹面镜曲率半径变形示意图

和新的曲率半径 R' 可分别表示为:

$$h' = h - \Delta h \quad (5)$$

和

$$R'^2 = [R' - (h - \Delta h)]^2 + r^2 \quad (6)$$

代入方程 (4), 则 (6) 式变为:

$$R'^2 = \{R' - [(R - \sqrt{R^2 - r^2}) - \Delta h]\}^2 + r^2 \quad (7)$$

式中 R' 为变形后腔镜的曲率半径, R 为腔镜公称曲率半径, r 为腔镜物理半径, Δh 为腔镜变形后中心球冠改变量。

实验表明, 由于凸面镜的物理直径较小, 其压力变形和热变形的干涉图样几乎没有变化。因而非稳腔几何放大率 M 、等效菲涅耳数 N_{eq} 和输出耦合率 δ 的改变, 主要由凹面镜曲率半径的变形所决定。表 1 为根据图 3、图 4 的实验数据和 (1)、(2)、(7) 式计算所得的凹面镜在压力变形和热变形情况下曲率半径 R 以及 M 、 N_{eq} 和 δ 的变化。

表 1 凹面镜在通水冷却和 2.1 kW 激光照射下的变形状态

中心干涉环变化数 n_1	边缘干涉环变化数 n_2	镜面中心球冠高度改变量 Δh	变形后曲率半径 R'_1
10	3.2	2.15 μm	14465 mm
变形后的几何放大率 M'	变形后的等效菲涅耳数 N'_{eq}	变形后的输出耦合率 δ'	
1.45	1.66	0.263	

从表 1 中可以看出, 对于 $M=1.4$ 的实验非稳腔, 由于凹面镜的动态变形所导致的曲率半径和几何放大率的改变仅在 3% 左

右, 对等效菲涅耳数和输出耦合率的影响并不严重。虽然腔镜在实际使用时, 腔内振荡光强比实验光照功率有成倍的增加, 但从图 4 中可以看出, 腔镜镜面的动态变形只是一个过渡过程, 对应于激光器的某一工作状态, 腔镜的变形总可以很快地达到平衡, 使非稳腔的输出功率和振荡模式相对稳定下来。

三、腔镜角向偏折的影响

非稳腔精确校准时, 最低阶模的共振光轴与两腔镜物理中心 A 、 B 重合。如果两腔镜 M_1 、 M_2 中的一个发生微小的角向偏折 θ (腔镜失调), 都将使共振腔光轴发生改变。设新老光轴之间的夹角为 ϕ , 定义输出光束近场图样仅为半个圆环时腔镜角向偏折角 θ 为失调临界角 $\theta_{\text{临}}$, 定义新老光轴夹角 ϕ 与腔镜角向偏折角 θ 的比值为该腔镜的失调灵敏度 S 。W. F. Krupke 和 W. R. Sooy 首先推导出了凹面镜失调时, 非稳腔失调灵敏度 S 和凹面镜失调临界角 $\theta_{\text{临}}$ 的大小^[1]:

$$\begin{cases} S_{\text{凹}} = 2M / (M - 1) & (8) \\ \theta_{\text{临}} = \frac{D}{L} \cdot \left(\frac{M - 1}{2M} \right)^2 & (9) \end{cases}$$

式中 D 为凹面镜镜面物理直径, L 为腔长, M 为非稳腔的几何放大率。

在实际使用时更多的是调节凸面镜, 因此我们将以凸面镜失调的前提出发, 推导出凸面镜失调时, 非稳腔失调灵敏度 $S_{\text{凸}}$ 和凸面镜失调临界角 $\theta_{\text{凸临}}$ 的大小。如图 6 所示, 当非稳腔精确校准时, 共振腔光轴为 O_1-O_2-A-B , 当凸面镜 M_2 发生微小角向偏折角 θ 时, 凸面镜的曲率中心从 O_2 变到 O_2' , 而凹面镜的曲率中心仍保留在原来的 O_1 位置。失调后新共振腔光轴变为 $O_1-O_2'-C-D$, 与原光轴的夹角记为 ϕ 。从图 6 中可以看出:

$$\phi \cdot (R_1 - L - |R_2|) = \theta \cdot |R_2| \quad (10)$$

凸面镜偏折前后新老光轴在凸面镜 M_2 上的位移 h 为:

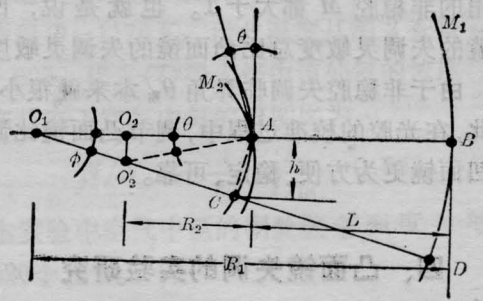


图 6 凸面镜 M_2 失调临界角计算用图

$$\begin{aligned} h &= \phi (R_1 - L) \\ &= \theta \cdot |R_2| \cdot (R_1 - L) / (R_1 - L - |R_2|) \end{aligned} \quad (11)$$

根据共焦非稳腔的定义有:

$$|R_2| = 2L / (M - 1) \quad (12)$$

$$R_1 = 2ML / (M - 1) \quad (13)$$

将(12)、(13)式代入(11)式, 可以得到:

$$h = \frac{2L \cdot \theta}{(M - 1)^2} \cdot (M + 1) \quad (14)$$

根据失调临界角的定义, 当 $h = a_2$ 时, 凸面镜失调临界角 $\theta_{\text{凸临}}$ 和失调灵敏度 $S_{\text{凸}}$ 可表示为:

$$S_{\text{凸}} = \frac{\phi}{\theta} = \frac{|R_2|}{R_1 - L - |R_2|} = \frac{2}{M - 1} \quad (15)$$

$$\theta_{\text{凸临}} = \frac{a_2 (M - 1)^2}{[(M + 1) \cdot 2L]} \quad (16)$$

式中 a_2 为凸面镜物理直径, M 为非稳腔几何放大率, L 为腔长。

对于 HGL-84 型横流电激励 CO_2 激光器实验正支共焦非稳腔, 其光腔参量为: 输出耦合镜内孔直径 $d = 12.5 \text{ mm}$, 腔长 $L = 2 \text{ m}$, 几何放大率 $M = 1.4$, 利用(16)式计算凸面镜失调时的失调临界角 $\theta_{\text{凸临}}$ 仅为 0.21 mrad 。

从失调灵敏度的定义中可以看出其物理意义在于: S 越大, 对于相同的镜面偏折角 θ , 光轴的偏转角 ϕ 也越大, 即光腔的稳定性越差。从(8)式和(15)式中可以看出:

$$\frac{S_{\text{凸}}}{S_{\text{凹}}} = \frac{2M / (M - 1)}{2 / (M - 1)} = M \quad (17)$$

即凹面镜的失调灵敏度 $S_{\text{凹}}$ 比凸面镜的失调灵敏度 $S_{\text{凸}}$ 大 M 倍, 正好等于非稳腔几何放大率的大小。一般情况下, 高功率激光器中

使用的非稳腔 M 都大于 1。也就是说，凹面镜的失调灵敏度总比凸面镜的失调灵敏度高。由于非稳腔失调临界角 $\theta_{\text{临}}$ 本来就很小，因此，在光腔的校准过程中，调节凸面镜比调节凹面镜更为方便、稳定、可靠。

四、凸面镜失调的实验研究

腔镜的角向偏折(腔镜失调)主要来自支架和腔镜调节机构不对称变形。计算表明，对于一个腔长 2 m 的共焦非稳腔系统，当其支架温升不对称值仅为 1°C 时，产生的不对称线胀变形足以使非稳腔腔镜角向偏折角达到其失调临界角 $\theta_{\text{临}}$ 的数值。因此，使用非稳腔时必须设计稳定对称腔镜调节装置，并且选择线胀系数小的材料作为支架，尽可能减少工作过程中的不对称变形的各种因素。图 7 是我们进行凸面镜失调的实验研究装置。凸面镜失调角 θ 的大小，通过 He-Ne 监视光束在屏上的位移 d 来反映。失调状态下非稳腔的输出功率和近场光斑图样，通过重衰减后在功率计和热敏纸上分别记录和显示出来。

实验结果是，当 $\theta=0.19\text{ mrad}$ 时，输出光斑近场图样略大于半个圆环，与其对应的输出功率也略大于全功率的一半，足见凸

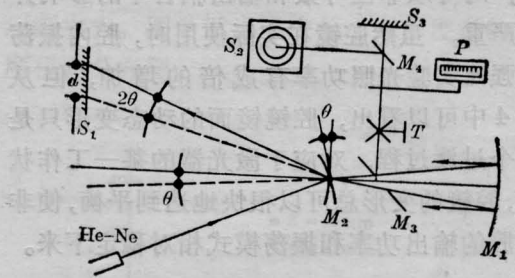


图 7 凸面镜失调时非稳腔输出特性实验装置示意图

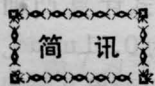
M_1 —凹面镜； M_2 —凸面镜； M_3 —输出耦合镜；
 M_4 —部分反射镜； S_1 —监测光屏； S_2 —热敏纸屏；
 S_3 —挡光耐火砖； T —衰减器； P —功率计

面镜的失调临界角 $\theta_{\text{凸临}}$ 略大于 0.19 mrad ，与理论计算值 0.21 mrad 的数值相吻合。虽然凸面镜的失调临界角很小，但腔镜偏折 $2\theta_{\text{凸临}}$ 时非稳腔并不停止振荡，一直到 $\theta=5\theta_{\text{凸临}}$ ，即 $\theta\approx 0.9\text{ mrad}$ 时非稳腔才完全停止振荡，输出功率为 0。

本文的实验研究工作，得到了何煦辉、张永方两同志的大力支持和帮助，作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] W. F. Krupke, W. R. Sooy; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1969, **QE-5**, No. 12, 575.
- [2] A. E. Siegman; *Laser Focus*, 1971, **5**, No. 7, 42.



KRS-5 多晶光纤损耗低于 2dB/m

KRS-5 多晶 (TlBr—TlI 混晶) 光纤在 $4\sim 20\mu\text{m}$ 波段范围内有良好的透过性能，是 CO_2 激光能量传输、中红外传感和红外光谱测量用的理想光纤。上海光机所八室晶体光纤组在 1985 年 7 月 4 日制成我国第一根 KRS-5 多晶光纤，最近又完成了高纯晶体生长装置，制作的光纤在 $10.6\mu\text{m}$ 的损

耗小于 2 dB/m 。此外采用该组发展的涂塑工艺，可在 $0.5\sim 0.7\text{ mm}$ 直径的光纤上均匀涂敷 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$ 厚的有机硅涂层，增加了光纤的强度，改善了可挠性。

(侯印春)