

# 正支共焦非稳定腔输出光束能量分布的实验研究

颜惠芝

(中船总第七一八研究所)

## Experimental investigation on energy distribution of output beam of a positive-branch confocal and unstable resonator

Yan Huishi

(Handan Purification Equipment Research Institute, Handan)

**提要:** 对燃烧驱动超声扩散混合型连续波 DF 化学激光器正支共焦非稳定谐振腔输出光束,作了近、远场能量分布的实验研究,测量表明,实测与理论分析基本一致。

**关键词:** 超声扩散混合型化学激光器

### 一、引言

由于非稳定腔能得到大的可控模体积和具有好的横模鉴别能力,因此在需获小光束发散角和大输出功率的激光器中,获得极为广泛的应用。

本文报道工作介质以超声速流动、扩散混合、反应的燃烧驱动连续波氟化氙化学激光器正支共焦非稳定谐振腔输出光束近场和远场能量分布的实验研究。

### 二、正支共焦非稳定腔主要参数

正支共焦非稳定腔示意图如图 1。它完全可用两个参数表征,即往返几何放大率  $M$  和几何菲涅耳数  $N_0$ <sup>[1]</sup>。且有

$$M = g_2/g_1 \quad (g_i = 1 - L/R_i)$$

式中  $L$  为腔长,  $R_i$  为球面镜曲率半径。

$$N_0 = (Ma_2)^2/L\lambda$$

$a_2$  为凸反射镜有效半径,  $\lambda$  为激光波长。  $M$  是非稳定腔的一个重要参数,非稳腔的许多特性与  $M$  密切相关。如模式选择能力,最低阶模的选择能力为<sup>[2]</sup>

$$S = R_{00}/R_{10} = R_{00}/R_{00}^{(2n+1)} = M^{-2}/(M^{-2})^2 = M^2$$

式中  $R_{00}$  为基模在共焦腔内往返一周之反射率,  $R_{10}$  为(10)模往返一周之反射率。

在 DF 化学激光器中,流动介质非均匀性对辐射发散度的影响为

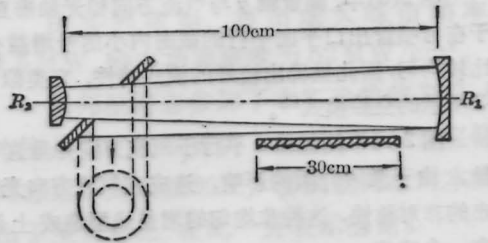


图 1 正支共焦非稳定谐振腔

$$0 \approx l\sqrt{n}/(1-1/M)$$

式中  $l\sqrt{n}$  为激活介质长度和介质折射率梯度。

为避免腔镜失调的影响,凹反射镜容许的震动容限为

$$x = \pm(N-1)(\lambda/d)(M-1)/2M$$

式中  $N$  为预定的输出光束发散角的衍射极限倍数,  $d$  为近场光环外径。

影响腔内功率提取效率的阈值增益为

$$g_t = (1/2l) \ln \frac{M^2}{r_1 r_2}$$

$r_1$ 、 $r_2$  为腔镜反射率。因此对于一个特定的  $l$ , 就有一个产生合乎需要的阈值增益  $g_t$  的放大率  $M$ , 而提取激光功率的相对效率正比于  $(1-g_t/g_0)$ ,  $g_0$  为小信号增益。

根据腔内增益和上述因素,我们选定几何放大率  $M$  为 1.5 和 2.6;腔长  $L=100$  cm;输出平面镜耦合孔  $M=1.5$  时,圆孔输出  $\phi=2.3$  cm,方孔输出为

2.3cm×2.3cm。M=2.6时，φ=1.15cm，圆孔输出的非涅耳数分别为80.5和59.2；介质区尺寸(喷管有效长度及高度)为30cm×3cm。

### 三、近场能量分布

图2是输出功率为3200W，距激光输出窗口50cm处烧蚀有机玻璃获得的方环近场图样。(a)是正视图，(b)、(c)是侧视图。烧蚀斑外环尺寸约3.5cm×3.5cm，内环尺寸2.3cm×2.3cm。符合近场亮环的外内环尺寸之比等于腔的往返放大率M。

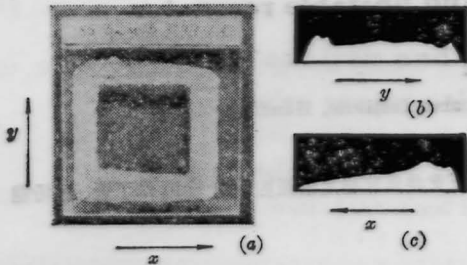


图2 M=1.5方孔输出近场烧蚀图

图2(b)中，测量轴y与气流方向和光轴垂直。由于在与喷管出口平面平行的截面内小信号增益分布比较均匀，因此呈现出较好的模式特性，它类似于图3所示的空腔模式<sup>[2]</sup>。

图2(c)中测量轴x平行于气流方向并垂直于光轴。由于激活介质的影响，造成在气流方向光强分布的非对称性，这种非均匀的增益线型造成上游区有一个峰值。

当M=1.5圆孔输出时，输出功率为2350W，有机玻璃烧蚀图的外环φ=3.5cm，内环φ=2.3cm。侧图与方孔输出烧蚀斑类似。

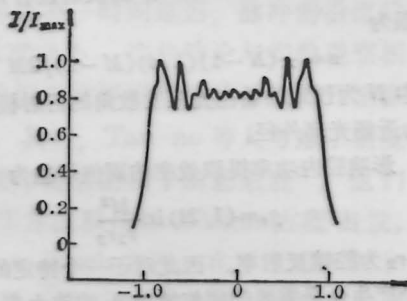


图3 输出镜上的空腔近场强度分布

### 四、远场能量分布

#### 1. 理论计算

由于正支共焦非稳定谐振腔的几何再现波型为

均匀平面波，因此可以将被平面波均匀照明的亮环作为非稳定腔输出光束的特征，其远场就是一个被平面波均匀照明的亮环的夫琅和费衍射图样。按衍射理论，可以算得远场强度角分布为<sup>[3]</sup>：

$$I(\omega) = \frac{I_0}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[ \frac{2J_1(kd_1\omega)}{kd_1\omega} - \varepsilon^2 \left( \frac{2J_1(k\varepsilon d_1\omega)}{k\varepsilon d_1\omega} \right)^2 \right]$$

式中ε为近场图中亮环的内外直径之比，即

$$\frac{d_2}{d_1} = 1/M;$$

J<sub>1</sub>为一阶贝塞尔函数；I<sub>0</sub>为远场图样中心处的光强度；k = 2π/λ；ω为远场分布图中的角半径。令

$$kd_1\omega = Z,$$

$$\text{则 } I(Z) = \frac{I_0}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[ \frac{2J_1(Z)}{Z} - \varepsilon^2 \left( \frac{2J_1(\varepsilon Z)}{\varepsilon Z} \right)^2 \right]$$

远场相对能量分布为

$$E^*(Z) = \frac{1}{2(1-\varepsilon^2)^2} \int_0^Z \left[ \frac{2J_1(Z)}{Z} - \varepsilon^2 \left( \frac{2J_1(\varepsilon Z)}{\varepsilon Z} \right)^2 \right]^2 Z dZ$$

对上述二式运算，M=1.5、2.6、∞的远场强度分布和能量分布曲线示于图4、图5中，如果令远场

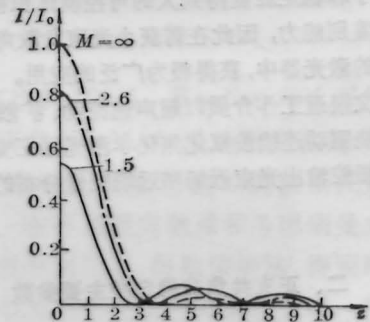


图4 M=∞、2.6、1.5的远场光强度分布

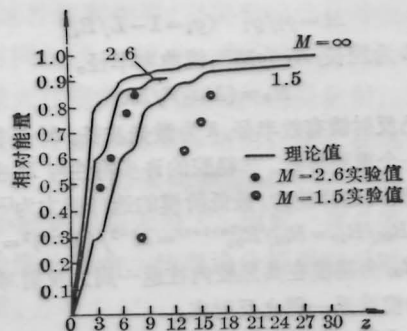


图5 M=∞、1.5、2.6的输出能量分布

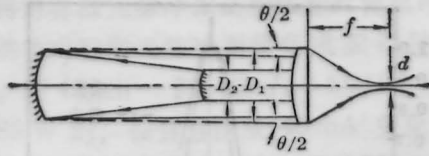


图6 共焦非稳定腔光束的发散和聚焦

光斑全能量为100%，对于  $M=1.5$ ，中心主瓣内占总能量约30%，第一侧瓣占31%，第二侧瓣占20%，第三侧瓣占10%…。 $M=2.6$ ，中心主瓣占60.5%，第一侧瓣占28.5%…。输出光束的发散角和聚焦光斑直径按照图6的定义表示如下<sup>[4]</sup>：

发散角  $\omega = Z(2/\pi)\lambda/d_1$ 。以83.8%的总能量为基准， $M=1.5$ 时， $Z=11.8$ ， $\lambda=3.8 \times 10^{-4}$  cm， $d_1=3.5$  cm，则  $\omega_{1.5}=0.815$  mrad； $M=2.6$ 时， $Z=5.8$ ， $\lambda=3.8 \times 10^{-4}$  cm， $d_1=3$  cm，则  $\omega_{2.6}=0.467$  mrad。

$$f=111.3 \text{ cm}, M=1.5,$$

$$D_{1.5}=f \cdot \omega_{1.5}=0.907 \text{ mm}.$$

$M=2.6$ ，聚焦光斑直径

$$D_{2.6}=f \cdot \omega_{2.6}=0.519 \text{ mm}.$$

## 2. 实验研究

### (1) 烧蚀金属板显示远场能量分布

$M=1.5$ 的共焦非稳定腔输出光束光经  $f=111.3$  cm的透镜聚焦，烧蚀放置在实际焦点放大约2.5倍处的黑色铜金属板，烧蚀功率1.5 kW，烧蚀时间为1s。其衍射花样照片如图7所示。

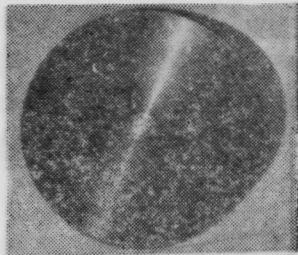


图7 烧蚀金属板显示的远场衍射图样  
 $M=1.5$ ， $P=1.5$  kW (照片放大1.5倍)

从照片中看到，图样中心是直径约2 mm、金属表面被熔化的烧蚀斑，熔化斑外侧为未变化的原金属黑色表面，宽度很窄。最外环是金属表面氧化层被烧掉的，宽度约为  $\phi_{in} \times \phi_{out}=2.3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的紫铜色圆环。

中心烧蚀的熔化斑直径约为2 mm，是由于中心主瓣、第一、二侧瓣之间相距很近(放大2.5倍后，第一、二、三暗环理论直径分别为0.558 mm、1.270 mm和1.979 mm)，它们各自所占的能量较大，分别为1%、31%、20%，故烧蚀1秒钟所显示的图样不能

将中心主瓣和侧瓣分开。最外环紫铜色烧蚀斑为第三侧瓣能量所致。

衍射图样表明， $M=1.5$ 的共焦非稳定腔远场能量的绝大部分包络在前四级衍射环带之内，与理论计算结果相符。

### (2) 烧蚀有机玻璃显示远场能量分布

对放大率  $M=1.5$ 的共焦非稳定腔输出光束(输出功率2.4 kW)，由焦距为111.3 cm的单透镜聚焦，烧蚀位于实际焦点放大2.5倍处的有机玻璃，烧蚀时间1s。图8是由烧蚀获得的远场照片图。

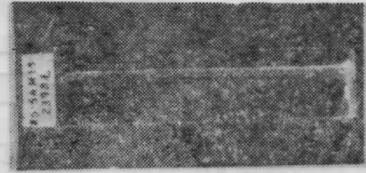


图8 烧蚀有机玻璃获得的远场图  
 $M=1.5$ ， $P=2.4$  kW

烧蚀图样表明，远场强度分布相当均匀，相当对称。由于烧蚀图样的圆对称性相当好，因此可采用计算体积的方法比较准确地计算出能量的角分布，计算结果示于图5。由计算得到  $M=1.5$ 、含总能量83.8%的发散角为1.09 mrad，焦斑直径1.21 mm，约为理论值的1.33倍。

此烧蚀法中有下列因素影响测量准确性：a，由于有机玻璃存在一阈值能量密度，这就不能算出低于阈值能量密度所影响的体积，尤其是烧蚀比较浅时较为严重。b，有机玻璃横向热传导，光束在烧蚀孔壁上多次反射和孔内烧蚀物质对光的散射，致使局部的输入能量密度和烧蚀深度的对应关系改变，增大横向烧蚀。这对于处在焦点上，烧蚀深度很深的情况影响很严重。c，由于我们采用的透镜焦距比较短，而烧蚀孔的深度较深(8.8 cm)，若靶材的始端平面处在焦平面上，则烧蚀末端离焦平面太远，偏离焦点的距离大大超过焦深。若焦深定义为<sup>[5]</sup>“点光源像的中心强度不超过某一定值范围”，如把不低于焦点强度的80%的范围作为焦深，则焦深

$$|Z_0| \leq \frac{\lambda}{2} \left( \frac{f}{a} \right)^2$$

本实验中  $f=111.3$  cm， $a=1.75$  cm， $\lambda=3.8 \times 10^{-4}$  cm，代入得  $|Z_0| \leq 0.768$  cm，为烧蚀深度的1/11.5，因此靶材始端放在焦点处弥散就很严重。

为了消除这三个因素的影响，对  $M=2.6$ 的测量采用红外扫描法。

### (3) 利用一维红外扫描法测量远场分布

采用铋化铝红外探测器测定焦点的强度分布。

红外探测器放在焦点放大2.5倍的地方,探测器前(紧靠)放置 $\phi=0.1\text{mm}$ 的光阑,取样用转镜反射光束,使光束扫过光阑。光束通过光阑射到探测器上的功率与远场强度分布成正比。探测器输出信号由瞬态波形存储器存贮和显示,存贮信号由 $x-y$ 函数记录仪画出分布曲线。实验装置如图9所示。

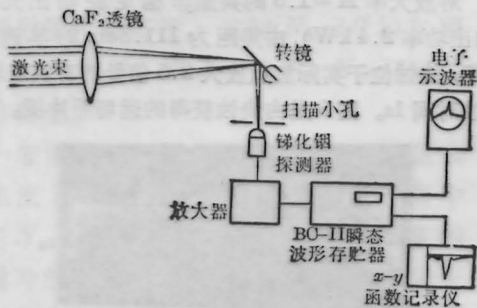


图9 一维红外扫描测量装置

图10是用此法对 $M=2.6$ 、 $P=250\text{W}$ 的共焦非稳定腔聚焦光束扫描获得的远场强度分布曲线。在类似条件下的有机玻璃烧蚀图表明,远场分布有较好的轴对称性,因此我们可以认为扫描图样同样有较好的轴对称性。由图10可见,扫描曲线的波谷位置与理论曲线的暗环位置十分接近。

同样用求体积比的方法得 $M=2.6$ 的相对能量分布(图5)。按83.8%能量计算,实测发散角为

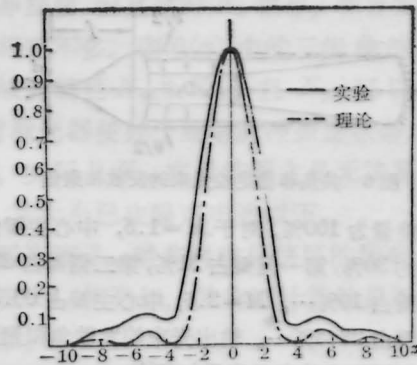


图10 远场强度分布曲线

$0.59\text{mrad}$ , 焦斑直径 $0.65\text{mm}$ ,为理论值的1.25倍。计算表明,实测主瓣内含理论主瓣能量的80.3%。

### 参考文献

- 1 Chester A. N., *Appl. Opt.*, **11**(11), 2584(1972)
- 2 Gross R. W., Bott J. P., "Handbook of Chemical Lasers"(John Wiley & Sons, New York, 1976), p. 132
- 3 Born M. and Wolf E., "Principles of Optics"(Sixth Edition, Pergamon Press, 1980), p. 416
- 4 永久治彦(じゅう), *光学*, **14**(3), 185~190 (1985)
- 5 久保田广, 刘瑞洋译"波动光学"(科学出版社, 1983), pp. 393~394

(收稿日期: 1987年6月1日)

(上接第48页)

PZT<sub>1</sub>上加的电压变化对应于频率失谐程度的变化这一关系,直接测量了注入锁定输出与频率失谐的关系,测量过程中保持注入光频不变。图(a)为在给定的注入波长下,不同的注入功率时注入锁定输出与失谐因子 $d\nu/\Delta\nu$ 的关系, $d\nu$ 为主激光器注入光频率与受迫激光器中与其最邻近的纵模频率的差, $\Delta\nu$ 为受迫激光器纵模频率间隔。图(b)为在给定的注入功率下,对于不同的注入波长注入锁定输出与失谐因子 $d\nu/\Delta\nu$ 的关系。显然 $d\nu/\Delta\nu$ 对注入锁定输出有很大的影响。当注入波长远离自由运转的中心波长,失谐的影响愈明显,输出功率将下降。

在图7中给出了与注入光方向相同一路光输出的放大倍数(I)以及相反一路输出缩小倍数(II)同注入功率的关系曲线。测量时不采用光栅单色仪,而在 $M_3$ 与 $BS$ 之间和 $M_3$ 与 $GF_2$ 之间分别放置一个极薄的分光镜,直接用光电接收器接收并在示波器上显示记录。

注入锁定输出不仅可是单纵模,也可是多纵模,

且输出线宽加宽。

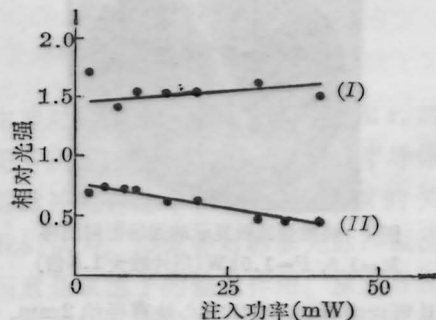


图7 放大输出与注入功率的关系

$\lambda_{\text{in}}=582.2\text{nm}$ , Nd:YAG 输入电压为 $900\text{V}$

### 参考文献

- 1 S. Blit et al., *Appl Phys.*, **12**, 69 (1977)
- 2 F. Tr hin et al., *Opt. Commun.*, **31**, 76(1979)
- 3 P. Verkerk et al., *Opt. Commun.*, **58**, 413 (1986)

(收稿日期: 1987年8月31日)