

# 自滤波非稳腔

尹宪华 袁才来

(中国科学院上海光机所)

**摘要:** 本文介绍了一种自滤波非稳腔。总结了这种腔的工作原理和优点,研究了场分布和滤波孔的几何尺寸与输出光振幅和发散度的关系。

**关键词:** 自滤波非稳腔

## Self-filtered unstable resonator

*Yin Xianhua, Yuan Cailai*

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

**Abstract:** This paper reports a novel unstable configuration with a self filtered aperture (SFUR). The principle and merits of SFUR have been summed up. The relationship between the size of filtering aperture, the light amplitude and the beam divergence have also been investigated.

**Key words:** self filtered unstable resonator

### 一、概述

在发展高功率激光共振腔工作中,需要解决的二个主要问题是:大的模体积和光滑的空间光束轮廓。新近发展的、被称为自滤波非稳腔(SFUR)能够解决上述问题,在国外已得到应用<sup>[1]</sup>。本文对该共振腔的工作原理和优点作一介绍,并对其场分布和滤波孔孔径尺寸与输出光振幅和发散度的关系作了研究。

### 二、工作原理及优点

SFUR是在负支非稳共焦腔基础上发展起来的一种共振腔,如图1所示。SFUR工作原理是:选择一个尺寸适当的滤波孔,插入负支非稳共焦腔的焦平面上。由 $M_1$ 反射光的中心爱里(Airy)斑部分正好通过这个小孔,通过孔的光再被放大和被 $M_2$ 傅里叶变换、准直。被 $M_2$ 反射的光的中心部分又通过小孔,依次循环,对其它高阶模进行抑制。这种共振腔的主要优点可归纳为以下二点。

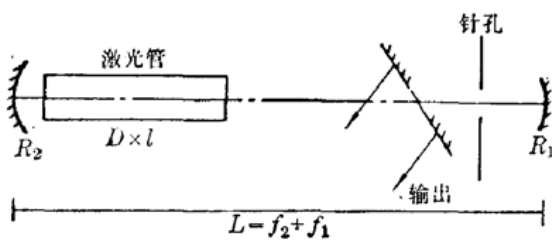


图1 自滤波非稳腔(SFUR)示意图

由于共焦面在腔内,光束在腔内来回振荡一次,负支共焦腔的模场便有二次朝远场

演变,只要在远场或共焦面上对光束的高频成份滤波,就能保证光束质量。同正支共焦腔相比,后者共焦面在腔外,所以在任何时刻,正支共焦腔的模场只能在近场发生演变,所以它的方向性要比 SFUR 差一些。由于评价光束质量的标准是看其在远场的强度分布如何, SFUR 能在腔内共焦面上对光束轮廓整形,这是该类激光共振腔的独特优点。

(2) 在大功率激光器应用中,过去多数采用正支共焦腔,其主要原因是负支共焦腔的焦点在腔内,光束的聚焦会破坏工作介质,从而影响光束质量。现在看来,这个问题是可以解决的。当采用 SFUR 装置后,光束在小孔上的衍射会抵消由  $M_1$  反射回来的光束在焦平面上聚焦产生的破坏作用。

另外,与正支共焦腔相比, SFUR 的模体积要小些,这是它的一个主要缺点。

### 三、SFUR 的本征值问题

由图 1 可知, SFUR 是一个非对称系统。采用圆柱坐标,其菲涅耳积分方程可表示为:<sup>[2]</sup>

$$\gamma \tilde{E}_1(s) = \int_0^1 ds' R(s, s') \tilde{E}(s') \quad (1)$$

$$\tilde{E}_1(s) = E_1(s) \exp[-jN_1 A_1 s] \quad (2)$$

$$R(s, s') = (-1)^{l+1} \pi^2 N_1^2 N_2^2 \int_0^1 ds'' J_l(2\pi N_1 \sqrt{ss''}) J_l(2\pi N_2 \sqrt{s's''}) \quad (3)$$

这里  $\tilde{E}_1(s)$  是孔径上的场振幅,积分方程的核  $R$  是非对称的实函数,菲涅耳数  $N_1, N_2$  定义为:

$$N_1 = w_A^2 / \lambda B_1, \quad N_2 = w_A^2 / \lambda B_2 \quad (4)$$

这里  $w_A$  为小孔半径,  $\lambda$  是入射波长。  $B_1, B_2, A_1$  是共振腔的传输矩阵元。如图 2 所示。 Gobbi 给出了上述方程的解析解<sup>[1]</sup>:

$$E_{pl}(\gamma, \varphi) = N_p^l \exp(jl\varphi) \times \gamma^l \exp[-(\gamma/w)]^2 L_p^l(\xi_c \gamma^2) \quad (5)$$

$$\gamma_{lp} = \exp(jK2L) (-1)^{l+1} \times \left[ \frac{1}{|m|} \frac{C^4 Z^2}{Z^2(1+C^4) + C^2} \right]^{l+2p+1} \quad (6)$$

这里  $L_p^l$  是拉盖尔多项式,  $N_p^l$  是归一化因子,  $p, l$  分别是模的径向和角向因子。其它参数有以下关系:

$$\xi_c = \xi_c^2 = \frac{\alpha(1 - |\gamma_0|^4)}{(1 - |m| |\gamma_0|^2)} \quad (7)$$

$$\gamma_0 = \exp(jK2L) (-1)^{1/2} \quad (8)$$

$$C = \frac{w_0}{w_A}, \quad w = Z \cdot w_A, \quad Z = \left[ \frac{1}{2} (A + A^2 + 4m^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$A = C^2(m^2 - 1) + m^2 C^{-2}, \quad \alpha = (Z^2 + C^2) / (C w_A Z)^2$$

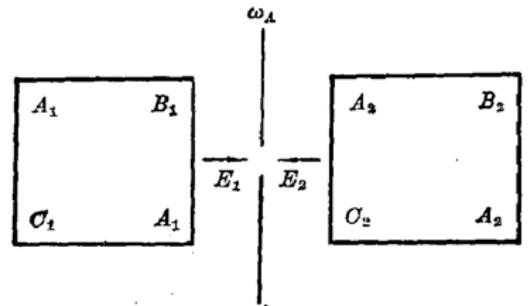


图 2 具有单内孔激光共振腔的 ABCD 阵矩

### 四、数值计算结果

1. 由图 3 可以看到本征值  $\gamma$  随  $C$  值增大(即光孔减小)而上升,然后很快达到稳定,这个稳定值是与几何放大率  $M$  有关的,即当  $C \rightarrow \infty$  时,  $\gamma = 1/M$ 。也就是说,当小孔无限小时,只

有一个球面波通过小孔, 这时完全可以用几何光学处理问题了。另外, 当小孔半径  $w_A$  大于基模半径  $w_0$  时, 即  $C < 1$ ,  $\gamma$  值也很小。这是因为基模半径  $w_0$  与腔结构有关,  $C$  越小,  $w_0$  越小, 模体积越小, 而共振腔的衍射损耗也就越大。随着  $C$  的增加 ( $C < 1$ ), 也即  $w_0$  增大,  $\gamma$  值上升。从图 3 可以看到  $\gamma_{00} \gg \gamma_{01}$ , 说明加了小孔对高阶模有很大抑制作用。计算还表明, 仅在  $C = 1$  时, 基模本征值与其它高阶模本征值之比为最大, 约 2 个数量级。

2. 由图 4 可知, 衍射损耗  $1 - \gamma^2$  在  $M$  值较小的情况下变化较大; 在  $M$  值较大的情况下变化不大, 几乎由几何表达式  $1 - 1/M^2$  来决定。即在  $M$  值较小时, 小孔尺寸对输出的影响较大。

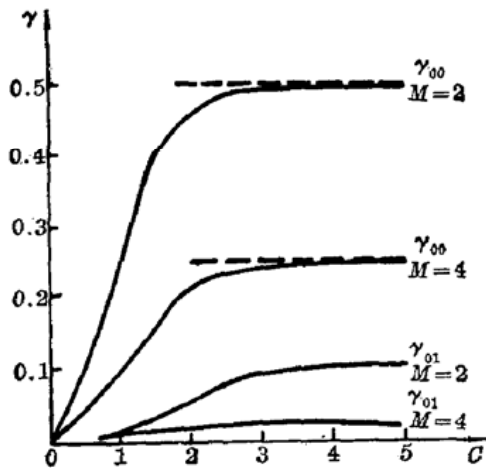


图 3 本征值  $\gamma$  与孔径比  $C$  的关系

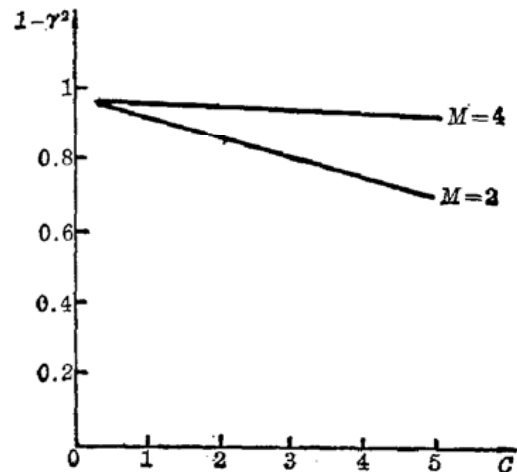


图 4 损耗值与孔径比的关系

3. 通常采用的正支非稳腔其输出光斑在远场的强度分布满足贝塞尔函数分布, 即 83% 的能量集中在第一个亮斑内, 还有 17% 的能量分散在高阶模上。我们在计算远场光强分布时考虑了  $u_{00}$ 、 $u_{10}$ 、 $u_{01}$  模的综合作用, 由于基模的本征值远大于高阶模的本征值, 远场光强分布近似为高斯分布。这说明小孔具有良好的滤波作用, 对输出光束的轮廓进行了整形。如图 5 所示, 该图是由计算机打印出来的。

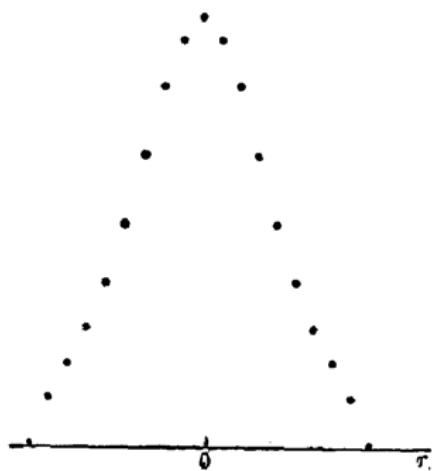


图 5 远场光强分布,  $M=4$ ,  $C=1.2$ ,  $\lambda=510.6 \text{ nm}$ ,  $w_0=0.4 \text{ mm}$

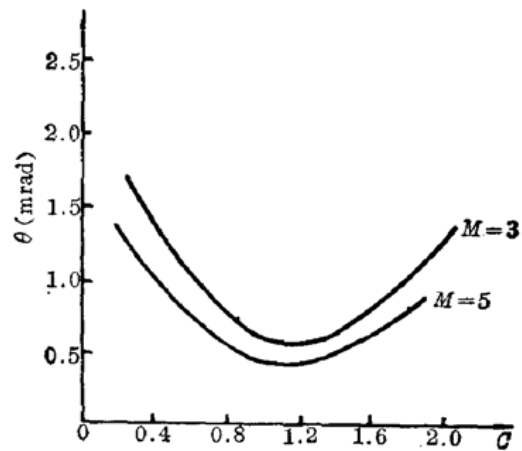


图 6 发散角与孔径比值关系

4. 图 6 给出了光束发散角与孔径比的关系。当  $C < 1$  时, 基模本征值相对减小, 高阶 (下转第 139 页)

为  $R = (CQ_0)/[\omega(1+u_{30})]$ 。由 (25) 式, 可得稳定圆轨道的条件为  $P_0 = \gamma_0$ ,  $P_1 = 0$ , 由此解得:

$$\begin{cases} \Omega_0/(\gamma_0\omega) = [1 + \Omega/(\gamma_0\omega u_{10})] \cdot (1 + u_{30}) \\ u_{20} = 0 \end{cases} \quad (32)$$

上两式给出了稳定圆轨道的条件, 可供设计时参考。在常  $\gamma$  或线性近似处理中, 该条件被忽略。

### 参 考 文 献

- 1 L. R. Elias, *Phys. Rev. Lett.*, **42**(15), 977(1979)
- 2 Y. Carmel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(7), 566(1983)
- 3 H. P. Freund *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**(7), 1080(1985)
- 4 H. P. Freund *et al.*, *Phys. Rev. A.*, **34**(3), 2007(1986)
- 5 H. P. Freund, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23**(9), 1590(1987)

(上接第 158 页)

模本征值相对增高, 由于各模式的贡献, 光束发散度随  $C$  的减小而增大。在这同时, 基模由于其半径  $w_0$  的减小也使得发散度增大。当  $C > 1$  时, 虽然高阶模被抑制了(见图 3), 但由于  $w_A \ll w_0$ , 光束发散角由光阑孔决定, 所以发散角也随滤波孔的减小而增大。在  $C = 1 \sim 1.2$  时, 发散角接近衍射极限。这表明, 在能够抑制高阶模的条件下, 不宜再减小孔径尺寸, 反之, 对输出功率和方向性都会带来不利。一般取孔径比值  $C$  为  $1 \sim 1.2$ 。

### 五、实验结果

自滤波非稳腔的设计主要满足以下几个关系:<sup>[3]</sup>

$$\text{SFUR 条件 } a = w_A = (0.61\lambda f_1)^{1/2} \quad (10)$$

$$\text{共焦条件 } L = f_1 + f_2 \quad (11)$$

$$\text{有效放大率 } M_{\text{eff}} = 1.5 M = -1.5(f_2/f_1) \quad (12)$$

$$\text{准直光束直径 } D = |M_{\text{eff}}| 2w_A \quad (13)$$

实验中往往受到实验室空间尺寸的限制, 因此自滤波非稳腔最宜用于高增益、小口径、大功率输出的激光器件。我们在一台极距 550 mm、内径 13 mm 的溴化亚铜激光器上做了实验。采用  $f_1 = 500$  mm,  $f_2 = 4000$  mm,  $w_A = 0.4$  mm 的反射镜和滤波孔, 获得方向性为 0.5 mrad 输出光。输出功率为采用稳腔输出时的 80%, 方向性提高 12 倍。采用 CCD 光电耦合装置, 测得光束截面上的光强分布, 如图 7 所示。很明显, 经小孔滤波, 远场光强接近高斯分布。

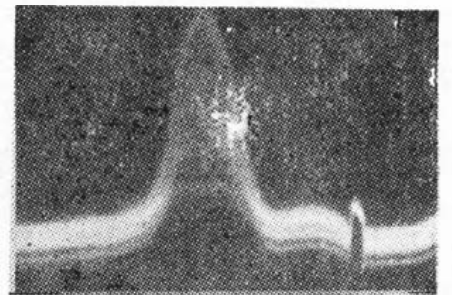


图 7 输出光束的强度分布

### 参 考 文 献

- 1 Gobbi and Real, *Opt. Commun.*, **57**, 355 (1986)
- 2 M. Piche, *Appl. Opt.*, **22**, 1999 (1983)
- 3 Gobbi and Real, *Appl. Opt.*, **24**, 26 (1985)