

大孔耦合输出的虚共焦非稳腔的研究

孙军强 孙书华 丘军林

(华中理工大学激光研究所, 武汉 430074)

提要 本文提出了一种新颖的、应用于高功率激光器的复合谐振腔——大孔耦合输出的虚共焦非稳腔。对这种腔的设计作了细致的分析,并给出设计方法。同时对该腔的激光模式进行了理论和实验研究,理论和实验结果相吻合。输出的最大激光功率为 750 W,相应的光电转换效率为 8.0%,输出激光的远场发散角为 1.73 mrad。

关键词 大孔耦合,虚共焦非稳腔,激光模式

Investigation of a confocal unstable resonator with large aperture coupling

Sun Junqiang, Sun Shuhua, Qiu Junlin

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A novel compound resonator — a confocal unstable resonator with large aperture coupling which can be applied to the high power lasers is presented in this paper. Design of the resonator is analysed in detail and method of design is provided. The laser modes of the resonator are studied both theoretically and experimentally. The theoretical results coincide with the experimental results. The output power is 0.75 kW with an efficiency of 8.0%, and the divergent angle in the far field is 1.73 mrad.

Key words large aperture coupling, confocal unstable resonator, laser modes

1 大孔耦合输出的虚共焦非稳腔的设计

大孔耦合输出的虚共焦非稳腔如图 1 所示, M_1 与 M_2 之间组成的虚共焦非稳腔具有良好的鉴模特性, M_1 与 M_3 形成稳腔系, 稳腔系对由非稳腔产生的激光谐振场实现正反馈放大。为此, 对该腔的设计有以下几点考虑: 1. 克服稳腔与非稳腔之间的模式竞争, 合理地选择阑孔的孔径大小, 抑制稳腔系中的高阶模振荡; 2. 选择大的横向放大率 M , 进一步提高光束质量; 3. M_1 的曲率半径选择足够大, 使稳腔系接近介稳腔^[1~5]。

收稿日期: 1991年3月18日; 收到修改稿日期: 1991年6月20日。

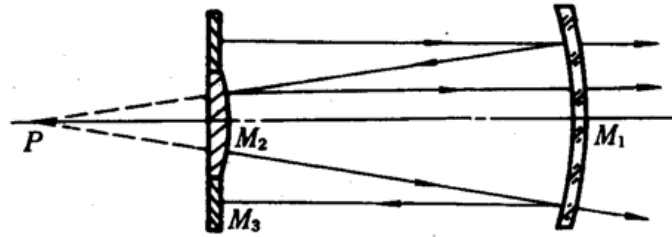


Fig. 1 A confocal unstable resonator with a large aperture coupling

由虚共焦条件, 横向放大率及有效菲涅耳数的关系为

$$M = R_1 / |R_2| \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}(M - 1)|R_2| = L \quad (2)$$

$$N_{eq} = \frac{1}{2} \left(M - \frac{1}{M} \right) \frac{a_2^2}{L\lambda} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: M 为腔的横向放大率; R_1, R_2 为 M_1, M_2 镜的曲率半径; L 为腔长; N_{eq} 为非稳腔的有效菲涅耳数; a_2 为阑孔的半径; λ 为激光波长。为使非稳腔具有良好的鉴模性能, N_{eq} 取半整数。

合理地选择 M_1 输出镜的透过率, 对实现大功率的提取是很有意义的, 从几何光学的角度来分析该腔输出功率的表达式。

光束在腔内如图 2 所示传播时, 其反射系数为 a_2^2/a_1^2 ; 光束在腔内如图 3 所示传播时, 其反射系数为 $(1 - T)(a_1^2 + a_3^2 - a_2^2)/M^2 a_2^2$ 。因此, 腔的损耗为

$$\delta = K \left[1 - (1 - T) \frac{a_2^2}{a_1^2} \cdot \frac{(a_1^2 + a_3^2 - a_2^2)}{M^2 a_2^2} \right] \quad (K < 1) \quad (4)$$

激光功率的表达式为

$$P = \frac{1}{2} \pi a_1^2 I_s \cdot T \left[\frac{g_0 l_0}{\delta + a'} - 1 \right] \quad (5)$$

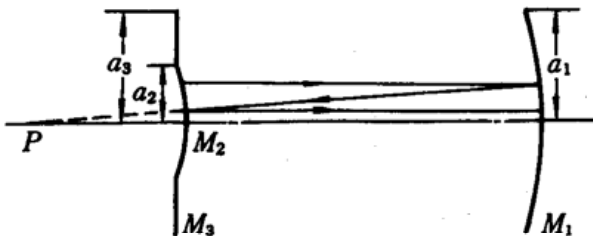


Fig. 2 Parallel output from mirror M_1

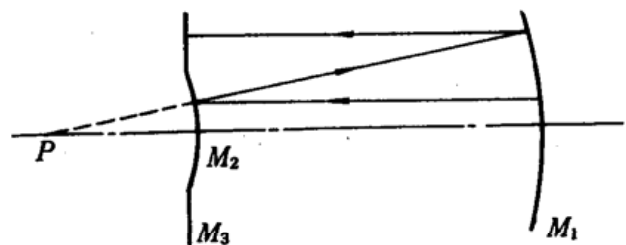


Fig. 3 Divergent output from mirror M_1

式(4), (5)中, P 为输出功率; I_s 为饱和光强; g_0 为小信号增益, l_0 为增益区长度; T 为输出镜的

透过率; M 为横向放大率; a' 为包含散射等各种损耗的系数; K 为比例常数; a_1, a_2, a_3 为 M_1, M_2, M_3 的半径。

令 $dP/dT = 0$, 得输出镜的最佳透过率为

$$T_{opt} = 1 - \frac{M^2 a_1^2}{a_1^2 + a_2^2 - a_3^2} \left\{ 1 - \frac{g_0 l_0 \left[K \left(1 - \frac{a_1^2 + a_3^2 - a_2^2}{M^2 a_1^2} \right) + a' \right]^{1/2} - a'}{K} \right\} \quad (6)$$

取 $g_0 = 0.004 \text{ cm}^{-1}$, $l_0 = 100 \text{ cm}$, $K = 0.5$, $a' = 1.5\%$, $a_1 = 16.5 \text{ mm}$, $a_3 = 15.0 \text{ mm}$, 经计算, 得最佳透过率跟横向放大率及阑孔半径的关系如图 4 所示。根据确定的横向放大率及 a_2 的大小, 由图 4 可选择最佳透过率。

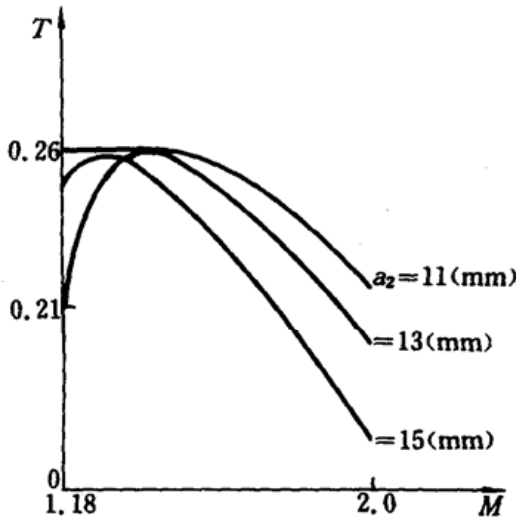


Fig. 4 Optimum transmissivity T as a function of magnification M and radius of the aperture a_2

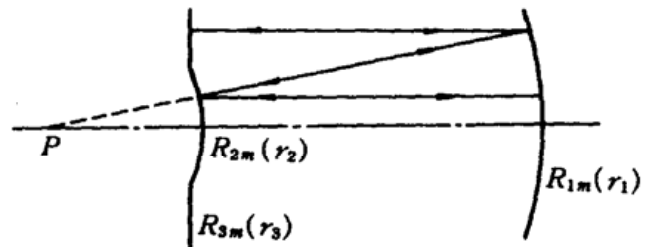


Fig. 5 Beams of the self-sustaining field propagating back and forth in the resonator

2 大孔耦合输出虚共焦非稳腔模式的理论研究

如图 5 所示, 从衍射积分方程出发来确定腔内的自洽场, 镜面上的场分布满足下列关系式:

$$\sigma_2 R_{2m}(r_2) = \frac{i^{m+1} K \cdot e^{-iKL}}{L} \int_0^{a_1} e^{\frac{iK}{2L}(g_1 r_1^2 + g_2 r_2^2)} R_{1m}(r_1) J_m \left(\frac{K r_1 r_2}{L} \right) r_1 dr_1 \quad (7)$$

$$\sigma_3 R_{3m}(r_3) = \frac{i^{m+1} K \cdot e^{-iKL}}{L} \int_0^{a_1} e^{\frac{iK}{2L}(g_3 r_3^2 + g_1 r_1^2)} R_{1m}(r_1) J_m \left(\frac{K r_1 r_3}{L} \right) r_1 dr_1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 R_{1m}(r_1) = & \frac{i^{m+1} K \cdot e^{-iKL}}{L} \left\{ \int_0^{a_2} e^{\frac{iK}{2L}(g_1 r_1^2 + g_2 r_2^2)} J_m \left(\frac{K r_1 r_2}{L} \right) R_{2m}(r_2) r_2 dr_2 \right. \\ & \left. + \int_{a_2}^{a_3} e^{\frac{iK}{2L}(g_3 r_3^2 + g_1 r_1^2)} J_m \left(\frac{K r_1 r_3}{L} \right) R_{3m}(r_3) r_3 dr_3 \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

式(7~9)中, $R_{1m}(r_1), R_{2m}(r_2), R_{3m}(r_3)$ 为 M_1, M_2, M_3 镜面上场的径向分量; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为与本征场相对应的本征值; r_1, r_2, r_3 为 M_1, M_2, M_3 镜面的径向极坐标; g_1, g_2 为 M_1, M_2 镜的 g 参数; J_m 为 m

阶贝塞尔函数。求得镜面 M_1 上的场分布后,经过透镜傅里叶变换,得到远场的光强分布。用 Fox-Li 方法计算获得该腔的近场及远场的光强三维分布如图 6,图 7 所示。



Fig. 6 Theoretical result of three-dimensional intensity distribution in the near field

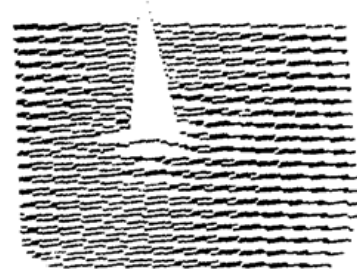


Fig. 7 Theoretical result of three-dimensional intensity distribution in the far field

理论计算结果表明,该腔激发的场同非稳腔激发的场相类似,近场光强分布中存在着大量起伏。远场光强分布中主瓣占了很大一部分能量而边瓣所占的能量很小。由此可见,该腔确能改善光束的质量。

3 大孔耦合输出的虚共焦非稳腔的实验研究

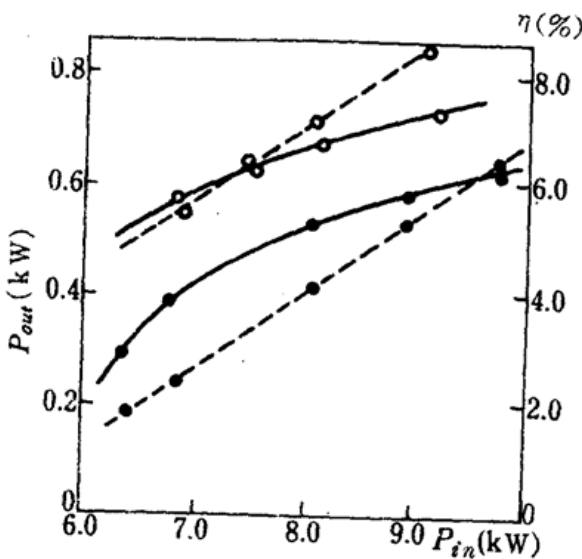


Fig. 8 Characteristics of the laser output
 Experimental parameters are:
 $P_{total} = 745^\circ \text{ Pa}$,
 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{Ar} = 1.5 : 10 : 10$,
 $\circ - T = 26\%$, $\bullet - T = 15\%$,
 $- - P_{out}$, $\cdots \eta$ (%)

在 HL 1250 型横流 CO_2 (无 He) 激光器上对该腔作了实验研究,当腔的横向放大率为 1.5, 输出镜的透过率为 15% 和 26% 时,实验所得的激光输出特性如图 8 所示,输出的最大功率为 750 W,相应的光电转换效率为 8.0%。

利用烧蚀有机玻璃板和对光束聚焦后烧蚀有机玻璃棒的办法,当激光功率为 750 W 时,观察到近场光斑及远场聚焦特性如图 9,图 10 所示。实验得到激光的光强分布与理论计算结果基本吻合。对近场光斑的细致分析发现,近场光斑除呈环状结构外,还包含了点状成份。从几何光学观点来看,该腔不仅存在球面发散波,也存在平行平面波,光斑呈这种结构是由于两列波在空间相互干涉的结果,其次还有各镜片边缘的衍射波。从远场聚焦特性来看,中央主瓣占有大量能量,而边瓣占有的能量很小。通过对焦平面上光斑大小的测量,测得远场发散角为 1.73 mrad。

在本课题的进行中,得到龚志伟副教授、唐宗化高级工程师、赵德宝高级工程师及陈义红讲师的大力帮助,深表感谢。

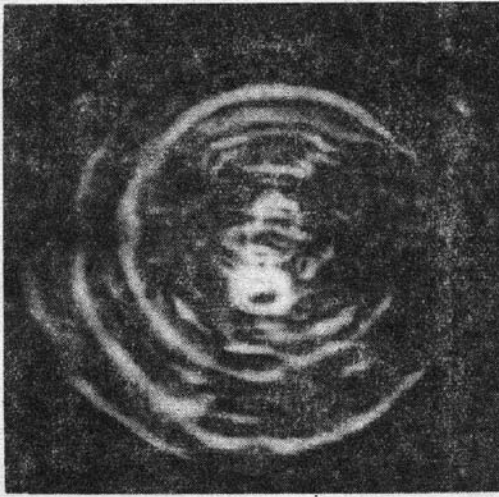


Fig. 9 The burned pattern of a near field spot
($T = 26\%$)

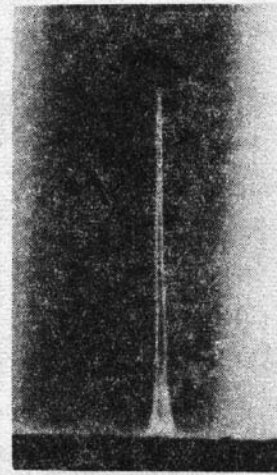


Fig. 10 The burned pattern focused in the far
field focused ($T = 26\%$)

参 考 文 献

- 1 C. P. Wang, R. L. Sandstorm, *Appl. Opt.*, **14**(6), 1285(1975)
- 2 Zhaogn Chen *et al.*, *Appl. Opt.*, **27**(5), 836(1988)
- 3 A. E. Siegman, *Proc. IEEE*, **53**, 277(1965)
- 4 R. R. Butts, R. V. Avizonis, *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 1072(1978)
- 5 Koji Yasui *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(7), 15(1988)