

阶梯反射输出的虚共焦非稳腔的研究

孙军强 丘军林 孙书华

(华中理工大学激光研究所, 武汉)

摘要: 本文提出了在高功率CO₂激光器上应用阶梯反射输出的虚共焦非稳腔。对这种腔的激光模式进行了理论和实验的研究。获得激光输出功率为700W, 相应的光电转换效率为7.9%, 激光的远场发散角为2.1mrad。

Investigation of a positive-branch unstable resonator with a step reflectivity mirror

Sun Junqiang, Qiu Junlin, Sun Shuhua

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

Abstract: A positive-branch unstable resonator with a step reflectivity mirror used in high power CO₂ laser is presented. This resonator is investigated both theoretically and experimentally. The output power of this resonator is 700 watts. With an efficiency of 7.9 percent. The divergent angle of far-field is 2.1 mrad.

一、引 言

经过对非稳腔的理论分析和实验研究表明: 如果腔的耦合输出镜上的反射率分布是高斯分布, 则镜面上场是高斯-拉盖尔分布^[1], 大量文献对输出镜镜面的各种反射率分布作了深入细致的分析^[2~7], 输出镜镜面上的反射率呈光滑曲线的非稳腔, 不仅能改善近场光斑的均匀性, 而且远场的聚焦性能也有较好的改善。本文设计的阶梯反射输出的虚共焦非稳腔是反射率超高斯分布的一种近似。

二、阶梯反射输出的虚共焦非稳腔设计

如图1所示是阶梯反射输出的虚共焦非稳腔。若输出镜镜面上的反射率呈高斯分布, 则有:

[4] Friesem A A, Ganiel U, Neumann G. A P L, 1973; 23: 249

[5] 张国威. 中国激光, 1988, 15: 272

[6] 潘少华. 物理学报, 1981, 30: 1067

$$R(\rho) = R_0 \exp[-(\rho/w_m)^2] \quad (1)$$

式中, ρ 为输出镜镜面上的径向极坐标; w_m 是反射率降至中心反射率 $1/e$ 处的位置; R_0 为输出镜中心的反射率大小。将(1)式进行泰勒展开有:

$$R(\rho) = R_0 \sum_{j=0}^{\infty} (\rho^2/w_m^2)^j \frac{(-1)^j}{j!} \quad (2)$$

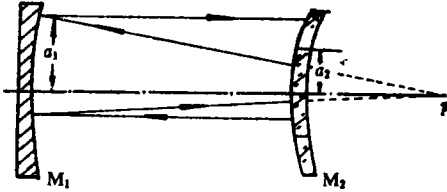


图1 阶梯反射输出的虚共焦非稳腔

取 $j=0$ 及 $j=1$ 两项,对应的是抛物线型分布;取不同的项,可以得到不同的分布。反射率各种分布随径向位置变化如图2所示,超高斯分布接近于阶梯分布,曲线平坦部分相当于整个镜面尺寸的70%左右,我们取中央半反射膜部分是整个镜面尺寸的70%。

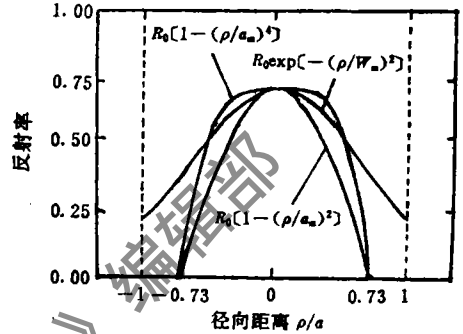


图2 输出镜镜面上各种反射率分布

考虑有阶梯反射率分布的非稳腔,如图1所示,它的几何损耗为:

$$\delta = K[1 - (1 - T)/M^2] \quad (3)$$

式中, K 为小于1的比例常数; T 为输出镜中央半反半透部分的透过率; M 为腔的横向放大率。腔输出的激光功率的表达式为^[8]:

$$P = \frac{1}{2} \pi a_2^2 I_s (M^2 + T - 1) \left\{ \frac{g_0 l_0}{K/M^2 \cdot (M^2 + T - 1) + a'} - 1 \right\} \quad (4)$$

式中, P 为激光输出功率; a_2 为输出镜中央镀半反半透膜的半径; I_s 为激光器的饱和光强; g_0 为横流 CO_2 激光器的小信号增益; a' 为包含反射镜的吸收、散射的损耗; l_0 为激光增益区长度。由 $\frac{dP}{dT} = 0$, 得到最佳透过率的表达式为:

$$T_{opt} = 1 + [(g_0 l_0 a')^{\frac{1}{2}} - a'] \cdot M^2 / K - M^2 \quad (5)$$

由(5)式,采用 l_0 为100cm, a' 为1.5%, K 为0.15,进行了计算,得到最佳透过率与横向放大率 M 及小信号增益 g_0 的关系,如图3所示。当 M 的值太大时,由于腔的损耗过大而难于形成振荡。根据腔的虚共焦条件、横向放大率、有效菲涅耳数的关系有:

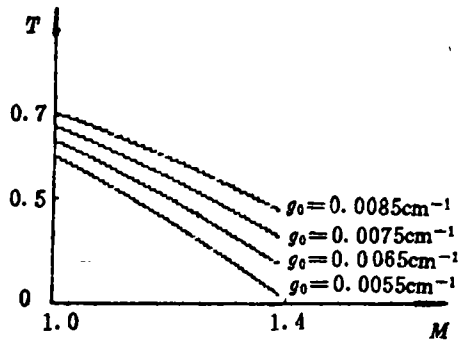


图3 最佳透过率跟横向放大率、小信号增益的关系

$$L = \frac{1}{2} (R_1 - |R_2|)$$

$$M = R_1 / |R_2|$$

$$N_{e,0} = (M - \frac{1}{M}) N \quad (8)$$

(6)式~(8)式中, R_1 为全反射凹面镜的曲率半径, R_2 为输出凸面镜的曲率半径, L 为谐振腔的腔长, $N_{e,0}$ 为腔的有效菲涅耳数, N 为腔的菲涅耳数。由(5)式~(8)式可选择腔的参数。

三、阶梯反射输出的虚共焦非稳腔模式的理论研究

用超高斯反射率分布来作为阶梯反射的一种近似。其反射率的分布为:

$$R(\rho) = R_0 \exp[-2(\rho/w_m)^n] \quad (9)$$

式中, n 为超高斯函数的次幂。

由几何光学原理, 谐振腔内建立的自洽场方程为:

$$\sigma u(\rho) = \frac{1}{M} \cdot [R(\rho/M)]^{\frac{1}{2}} u(\rho/M) \quad (10)$$

式中, σ 为跟自洽场相对应的本征值; $u(\rho)$ 为镜面上的场分布。由(10)式, 基模的场分布为:

$$u_0(\rho) = A \exp[-(\rho/w_1)^n] \quad (11)$$

式中, $w_1 = w_m(M^n - 1)^{1/n}$ 。跟基模相对应的本征值为:

$$\sigma_0 = R_0^{\frac{1}{2}} / M \quad (12)$$

而高阶模的场分布为:

$$u_m(\rho) = u_0(\rho) \rho^m \quad (13)$$

相对应的本征值为:

$$\sigma_m = R_0^{\frac{1}{2}} / M^{m+1} \quad (14)$$

基模的损耗为:

$$\Gamma_0 = 1 - \sigma_0 \sigma_0^* = 1 - R_0 / M^2 \quad (15)$$

而高阶模的损耗为:

$$\Gamma_m = 1 - R_0 / M^{2(m+1)} \quad (16)$$

经过这样计算发现: 这类腔的基模是超高斯型分布, 且具有良好的模式鉴别力。

要准确地确定场的模式, 必须求解衍射积分方程, 镜面上场径向分布的衍射积分方程为:

$$k_{m1} u_m(\rho_2) = 2\pi CN \int_0^1 \exp[-i\pi NG(\rho_1^2 + \rho_2^2)] J_1(2\pi N\rho_1\rho_2) u_m(\rho_1) \rho_1 d\rho_1 \quad (17)$$

式中, k_{m1} 为跟场相对应的本征值; $u_m(\rho_1)$, $u_m(\rho_2)$ 为镜面场的径向分布; $C = i^{l+1} \exp(-iKl)$; G 为腔的 G 参数。

我们设计的腔的菲涅耳数较大, 故用逐渐近似理论^[9,10]来计算, 镜面上的场分布可表示为:

$$u_m(\rho_2) = f(\rho_2) \exp(-i\pi N_{e,0} \rho_2^2) \quad (18)$$

仅考虑 $f(\rho_2)$ 部分, 设腔内的场是几何球面波与边缘衍射波的叠加。

$$f(\rho_2) = f_0(\rho_2/M^n) - F_1(\rho_2/M^n, t/M_{n-1}) \quad (19)$$

根据输出镜面上不同反射率分布, 可得不同的球面波 f_0 。(19)式中, $t = \pi NM$,

$$M_{n-1} = \sum_{i=0}^{n-1} M^{-2i}$$

$$F_1(\rho_2, t) = i^l / (1 - \rho_2^2) \cdot \exp[-it(1 + \rho_2^2)] \cdot [J_l(2t\rho_2) + i\rho_2 J_{l+1}(2t\rho_2)] \quad (20)$$

由文献〔9〕知，当 $M^2 = 250N_{c0}$ ，腔内场的渡越才能达到稳定，则腔外的近场分布为：

$$u_N(\rho_2) = [1 - R(\rho_2)]^{\frac{1}{2}} u_n(\rho_2) \quad (21)$$

经过薄透镜的傅里叶变换，远场的光强分布为：

$$I(\rho_f) = 4\pi^2 / \lambda^2 f^2 \left| \int_0^1 u_N(\rho_2) J_1(2\pi/\lambda f \rho_f \rho_2) \rho_2 d\rho_2 \right|^2 \quad (22)$$

式中， λ 为激光的波长； $u_N(\rho_2)$ 为腔的近场分布； f 为薄透镜的焦距； $I(\rho_f)$ 为焦平面上的光强分布； ρ_f 为焦平面上的径向极坐标。经过计算，得到近场的光强 $|u_N(\rho_2)|^2$ 及远场的光强 $I(\rho_f)$ 的分布如图4、图5所示。

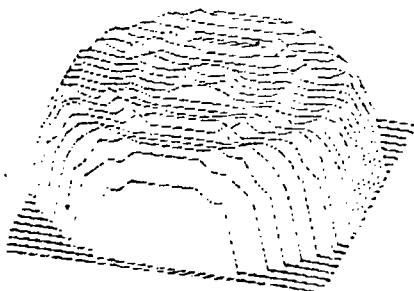


图4 近场光斑的理论结果

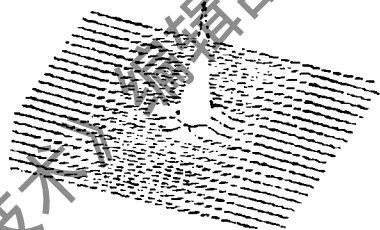


图5 经聚焦后远场光强分布的理论结果

从理论结果来看，近场分布近似于超高斯分布，且较均匀，远场的聚焦特性也较好，中央主瓣占有大部分能量，而边瓣所占的能量较少。

四、阶梯反射输出的虚共焦非稳腔的实验研究

在横流 CO_2 (无He) 1.25kW激光器上对阶梯反射输出的虚共焦非稳腔进行了实验研究。腔长为1.5m，腔的横向放大率为1.2，中央半反半透膜的透过率为10~13%，这种腔激光输出特性曲线如图6所示，在给定的实验条件下，该腔输出的激光功率为700W，相应的光电转换效率为7.9%。

经过烧蚀有机玻璃板和对光束聚焦后烧蚀有机玻璃棒的办法，得到激光的近场光斑及远场聚焦特性如图7、图8所示，实验获得的近场光斑并非很均匀，一方面是中央半反射膜与边缘增透膜不是光滑过渡，难免由于衍射效应而产生环状；另一方面是采用输出镜口径大，较薄，密封圈挤压应力作用，引起输出镜形变，带来近场光斑的非均匀且不完整。从远场的聚焦特性来看，中央主瓣占大量的能量，边瓣占有的能量较小，通过对焦平面上光斑尺寸的测量，得到远场的发散角为2.1mrad。跟一般的非稳腔相比，远场的聚焦特性有明显的改善。

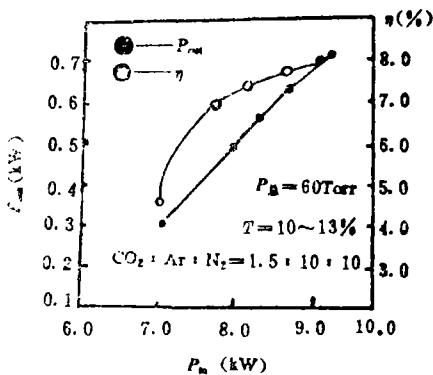


图6 阶梯反射输出虚共焦非稳腔的输出特性



图7 实验得到激光近场光斑

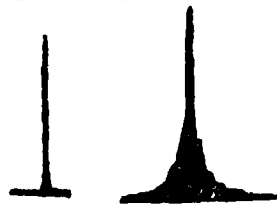


图8 阶梯反射输出的虚共焦非稳腔的激光远场聚焦特性(左)与一般非稳腔^[11]的激光远场聚焦特性

五、结 论

从几何光学及损耗的关系建立了阶梯反射输出虚共焦非稳腔激光输出功率跟横向放大率、小信号增益的关系,为这种腔的设计提供了基础。从几何光学近似及衍射积分方程出发,对这种腔的模式进行了理论分析,结果表明,光强的近场分布较均匀,远场的聚焦特性有明显的改善。经过实验研究表明:在现有的实验条件下,该腔输出的激光功率为700W,相应的光电转换效率为7.9%,远场发散角为2.1mrad。同时发现,改善反射率分布曲线的光滑性及减少机械形变的重要性。

在本课题的进行中,得到了龚志伟副教授、唐宗化高工、陈义红讲师、赵得宝高工的大力帮助和支持,借此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Zucker H. Bell Syst Tech J, 1987, 49(9): 2349~2376
- [2] Silrestri S De, Laporta P, Magni V et al. Opt Lett, 1987, 12(2): 84~86
- [3] Walsh D M, Knight L V. Appl Opt, 1986, 25(17): 2947~2954
- [4] Snell K J, McCarthy N, Piche M. Opt Commun, 1988, 65(5): 337~381
- [5] Lavigne P. Canad J Phys, 1988, 66, 888~895
- [6] McCarthy N. Appl Opt, 1984, 23(21): 3845~3850
- [7] Silrestri S De. Opt Lett, 1988, 13(3): 201~203
- [8] 周炳琨. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1980: 90~97
- [9] Butts R R, Avizonis R V. J O S A, 1978, 68: 1072
- [10] Horwitz P. J O S A, 1973, 63: 1528
- [11] Cheng Zuhai, He Xuhui, Li Zaiguang. Appl Opt, 1985, 24(23): 4260~4264

*

*

*

作者简介: 孙军强, 男, 1965年11月出生。博士研究生。曾从事激光谐振腔研究, 现从事色心激光器及光纤通讯研究。

收稿日期: 1991年5月10日。