

用于连续高功率 YAG 激光器的 高斯镜稳定腔的设计

夏文建 李正佳 张 勇 丘军林

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 本文通过对高斯镜热透镜稳定腔 (GRMSR) 内光束特征的分析, 提出了设计该类激光谐振腔的一般原则, 并设计了平平腔型高斯镜稳定腔。实验结果与理论分析相符, 并得到高输出功率、高光束质量的连续 YAG 激光输出。

关键词: 连续 YAG 激光器 高斯镜稳定腔

Gaussian stable resonators design for high power CW YAG laser

Xia Wenjian, Li Zhengjia, Zhang Yong, Qiu Junlin

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: Based on the analyzing of beam transmission characteristics inside Gaussian reflective mirrors stable resonator (GRMSR) with thermal lensing, the general principles for design of the kind of resonators and plane parallel resonators are presented in this paper. The experimental results are well accordent to theoretical analysis. And the high power, high beam quality CW YAG laser beam is obtained.

Key words: CW YAG laser Gaussian stable resonator (GRMSR)

一、引 言

目前, 高功率固体激光器的输出功率已达 kW 级水平, 这类激光器普遍采用稳定多模谐振腔。由于高阶模式的振荡使得光束的能量分布及传输特性变差, 导致可聚焦性变坏。其光束参数乘积一般在 $30 \sim 50 \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 之间, 光束质量需进一步改善。采用高斯镜或超高斯镜的变反射率镜非稳腔 (VRMUR) 已用于脉冲 YAG 系统并得到了输出功率为数百瓦, 光束参数乘积为 $3 \sim 5 \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的脉冲激光输出^[1,2]。VRMUR 的环程放大倍数 M 一般设计为 $M \geq 2.0$, 所以谐振腔的透射损耗 $(1 - R_0/M^2)$ 较大, 其中 R_0 为 VRM 的中心峰值能量反射率, 因而, VRMUR 适用于具有高的小信号增益值的脉冲 YAG 激光系统, 其小信号增益值 $(g_0 l)$ 在 $3 \sim 6$ 之间。(g_0 为激活介质单位长度增益, l 为激活介质长度。)

对于连续 YAG 系统,由于其小信号增益较低,非稳腔结构不再有效。可采用带高斯镜的稳定腔(GRMSR)结构,利用高斯镜作为选模和耦合输出元件来得到高功率、高光束质量的连续 YAG 激光输出。

二、谐振腔设计

高斯镜的能量反射率分布由

$$R(r) = R_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right) \quad (1)$$

给出, w_0 为 R 降到 R_0 的 $1/e^2$ 时所对应的半径值。高斯镜的反射矩阵为^[3]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{GRM}} - \frac{i\lambda}{\pi w_0^2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{GRM}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{\rho_{GRM}} = \frac{1}{\rho_{GRM}} + \frac{i\lambda}{2\pi w_0^2} = \frac{1}{\rho_{GRM}} + ih$, $h = \frac{1}{2\pi w_0^2}$, ρ_{GRM} 为高斯镜面曲率半径。

由于激活介质的热效应,激光棒等效于一个厚透镜,为分析问题方便,我们用具有可变焦距 f 的薄透镜来分析。谐振腔的几何结构参数和镜面上高斯光束对应 q 参数如图 1 所示。图 1 中, ρ_{URM} , q_1 , q_1' 和 ρ_{GRM} , q_2 , q_2' 分别为均匀镜和高斯镜上的镜面曲率半径,入射光束对应的 q 参数,反射光束对应的 q 参数。 l_1, l_2 为透镜距两反射镜的距离。腔长 $l = l_1 + l_2$ 。

由于 GRM 的反射矩阵(2)式中出现复曲率半径 ρ_{GRM} ,导致谐振腔的 G 参数和 $ABCD$ 矩阵元素出现复参量 $\bar{G}_2, \bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ 。 q_2 和 q_2' 对应的高斯光斑 w_2 和 w_2' 之间存在以下关系:

$$\frac{1}{w_2'^2} = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{w_2^2} \quad (3)$$

当 w_0, w_2, w_2' 均为大于 0 的有限的实数时,从(3)式可看出,必须有 $w_2 > w_2'$ 。这使得腔内高斯光束在不同的方向上沿不同路径进行传输,如图 2 所示,原因在于当 q_2 对应光束入射到 GRM 上时入射光束有部分能量透

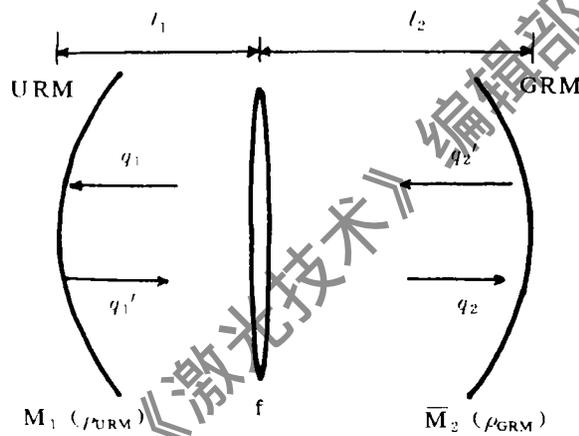


Fig. 1 Geometrical parameters and q parameters of Gaussian stable resonators with thermal lensing

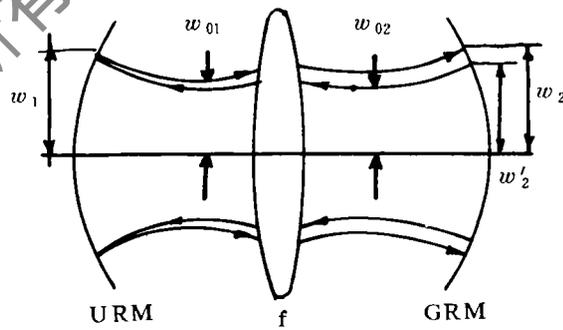


Fig. 2 Profile of Gaussian beam inside GRMSR

过 GRM,使得 GRM 上入射光束和反射光束对应的 q 参数的等相位面曲率半径和光束直径发生变化。

我们定义
$$M = \frac{w_2}{w_1} \quad (M \geq 1) \quad (4)$$

为 GRM 上高斯光斑放大倍数, 简称放大倍数, 由(3)式、(4)式得到

$$\begin{cases} w_2' = \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{M} w_0 \\ w_2 = \sqrt{M^2 - 1} w_0 \end{cases} \quad (5)$$

此外, M 对应着 GRMSR 的 ABCD 复矩阵的本征值的绝对值, 即

$$M = |\lambda| = \left| \frac{\bar{A}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\bar{A} + \bar{D}}{2}\right)^2 - 1} \right|_{\max} = \left| 2G_1\bar{G}_2 - 1 \pm \sqrt{(2G_1\bar{G}_2 - 1)^2 - 1} \right|_{\max} \quad (7)$$

max 表示取 $|\lambda|$ 中大于 1 的值。

TEM₀₀ 模经 GRM 耦合输出后光场分布为

$$I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_2}\right)^2\right) [1 - R(r)] \quad (8)$$

对应的透射损耗为

$$L_{00} = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_2}\right)^2\right) [1 - R(r)] r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_2}\right)^2\right) r dr d\theta} = 1 - \frac{R_0}{M^2} \quad (9)$$

同理, TEM₀₁ 模的透射损耗为

$$L_{10} = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_2}\right)^2\right) [1 - R(r)] r^3 dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta I_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w_2}\right)^2\right) r^3 dr d\theta} = 1 - \frac{R_0}{M^4} \quad (10)$$

对于由拉盖尔多项式表征的 TEM_{pl} 模, 其透射损耗为

$$L_{pl} = 1 - \frac{R_0}{M^{2(2p+l+1)}} \quad (11)$$

我们定义选模因子

$$\delta = 1 - \frac{1 - L_{10}}{1 - L_{00}} = 1 - \frac{1}{M^2} \quad (12)$$

当 $\delta = 1$ 时, 我们得到完全的模式分辨, 即所有的高阶模经单次射后被损耗掉了; 当 $\delta = 0$ 时, 我们将得不到模式分辨。从(4)式、(5)式可以看出由于 GRM 的作用导致 M 为大于 1 的实数, 从而使高斯镜稳定腔具有选模作用, 高次模振荡由于其透射损耗大而被抑制, M 越大, 其选模作用越好。

连续高功率 YAG 激光器要求有宽域的运行稳定性, 高的输出功率和高质量的激光输出。因而其谐振腔的设计要遵循以下原则:

1. 放大倍数 M 随热焦距应缓慢变化, 以维持大的运行稳定范围;
2. R_0 和 M 的选择应适当, 一方面使谐振腔具有足够的能量反射率以维持激光振荡并尽可能得到高的输出功率, 另一方面要尽量使输出光场保持均匀分布, 防止腔内中心能量密度过高而损坏腔镜的高反射区域;
3. 在许可的条件下, 尽量增大 M 的值, 以得到高的模式分辨和大的模体积。

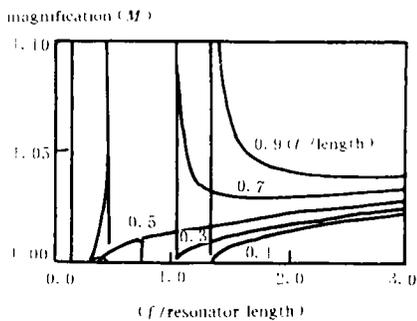


Fig. 3 Magnification vs thermal focal length f for different position of lens in plane-plane resonators ($w_0 = 2.0\text{mm}$)

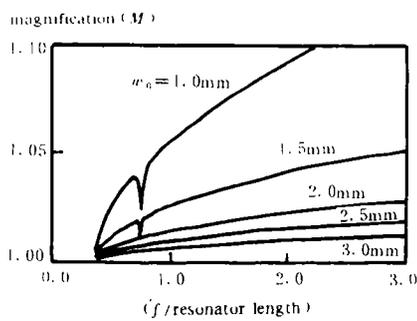


Fig. 4 Magnification vs thermal focal length f for different w_0 of GRM of symmetrical plane-plane resonators

图 3 给出了平平腔型中, 以 l_1/l 作参量, 放大倍数 M 随热焦距 f 的变化关系 ($w_0 = 2.0\text{mm}$), 放大倍数随热焦距的变化存在两种不同的变化区域, 即剧烈变化区和缓慢变化区。当 $l_1/l = 0.5$ 时, 具有最宽的缓慢变化区, 此时连续激光器可以在最宽的输入功率范围内稳定地工作, 当 l_1/l 比 0.5 大或小时, 即谐振腔的非对称性加剧, 其剧烈变化区扩展, 此时激光器的稳定工作范围变窄, 因此, 对于平平腔型, GRMSR 的几何参数应选择为对称型或使激光棒稍靠近 GRM 位置。图 4 给出了对称平平腔中以 w_0 作参量, 放大倍数 M 随热焦距 f 的变化关系。高斯镜的 w_0 越小, 放大倍数 M 越高, 结果会导致高次模式分辨。考虑到连续激光器的能量耦合输出主要在 GRM 上半径为 w_0 附近区域以内, w_0 选则应适当。太大则使 GRM 的选模作用变差, 太小则会降低激光器的输出功率。

三、实验结果与分析

实验中, 我们采用双灯泵浦, 输入功率在 $0 \sim 10\text{kW}$ 之间变化, 激光棒的几何尺寸为 $\varnothing 8\text{mm} \times 110\text{mm}$, 测得的热焦距在 $\infty \sim 35\text{mm}$ 之间, 谐振腔的几何参数为 $l_1 = l_2 = 250\text{mm}$, $\rho_1 = \rho_2 = \infty$, 总腔长 500mm , 谐振腔几何参数的选择保证连续激光器在整个输入功率范围均运行在稳定区 ($0 < g_1 g_2 < 1$), 在此区域内, 谐振腔的放大倍数 M 保持缓慢变化(见图 3 中曲线 3), 由于优化的均匀镜平平腔在高输入功率 ($P_{in} = 10\text{kW}$) 条件下, 其最优反射率为 80% 左右, 我们选取 GRM 的参数为 $R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$ 。实验中我们选择另一 GRM, 参数为 $R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$, 以及一均匀镜 $R = 80\%$ 作对比。理论计算的 GRMSR 谐振腔对 TEM_{00} 模的能量反射

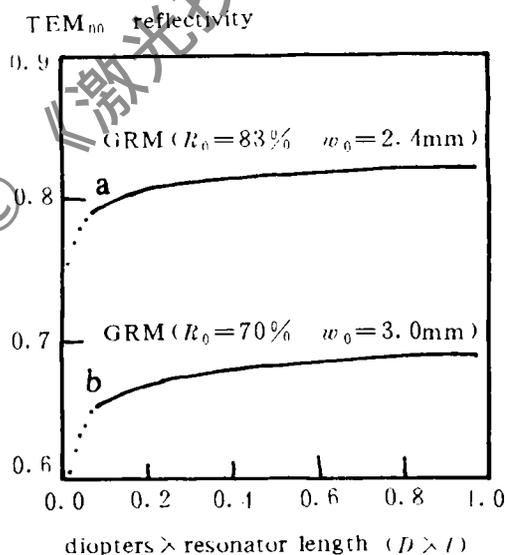


Fig. 5 Theoretically calculated energy reflectivity of GRM on TEM_{00} mode vs thermal focal length f ($d = 1/f$) for parameter R_0
a - $R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$ b - $R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$

率随热焦距的变化如图5所示。实验测得的在相同输入功率条件下,采用 GRMSR 和 URMSR 时所对应的输出功率如图6。图7给出了在相同输出功率条件下,GRMSR 和 URMSR 所对应的光束参数乘积。

图6中,在相同输入功率条件下,采用参数为 $R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$ 和 $R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$ 的高斯镜,由于前者所对应的基模的能量反射率 R_0/M^2 比后者的要高,且更接近于 80% (见图5),所以其输出功率要比后者的要高。但它们的输出功率都比采用优化的均匀镜稳定腔的要低,原因在于采用 GRM 后,高次模的振荡受到抑制,同时,我们采用的 GRMSR 未进行优化设计,激光器尚未工作在最佳状态。如输入功率为 10kW 时,采用 URMSR 的激光器输出功率为 350W ,而采用 GRMSR 的激光器输出功率分别为 180W 和 170W 。

采用 GRMSR 后,GRM 的选模作用使得输出激光束中低次模的振荡占主导地位,这将改进光束质量。谐振腔的放大倍数越大,其选模因子越大,光束质量会更好,图4中的曲线表明,采用 GRM($R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$)后,谐振腔的放大倍数要比采用 GRM($R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$)的要高,因而前者的光束参数乘积要比后者的低,见图7。图中对应于优化的平平均匀镜稳定腔,当输入功率为 6.7kW 时,激光器输出功率为 180W ,光束参数乘积为 $15.0\text{mm}\cdot\text{mrad}$,而对应于 GRM($R_0 = 83\%$),输入功率为 10kW 时,激光器的输出功率为 180W ,而此时,输出激光束的光束参数乘积仅为 $6.25\text{mm}\cdot\text{mrad}$,光束质量大大改进。

实验中,由于我们采用的是中等尺寸的激光棒($\varnothing 8\text{mm} \times 110\text{mm}$),选择的 GRM 所对应的谐振腔的放大倍数 M 较低,因而谐振腔的模式分辨率和激活介质的有效模体积均有限,有待于进一步提高激光器的输出功率,可采用大尺寸的激光棒或采用多棒串接的方法来增加激光器的单程增益,同时对 GRM 的参数及谐振腔进行优化设计,提高谐振腔的放大倍数并增大激活介质的有效模体积,从而得到更高输出功率,高光束质量的连续 YAG 激光输出。

四、结 论

采用带高斯镜的稳定腔(GRMSR)可以利用 GRM 作为耦合输出和选模元件,并适当地选择谐振腔型,可以得到高输出功率、高光束质量的连续激光输出。

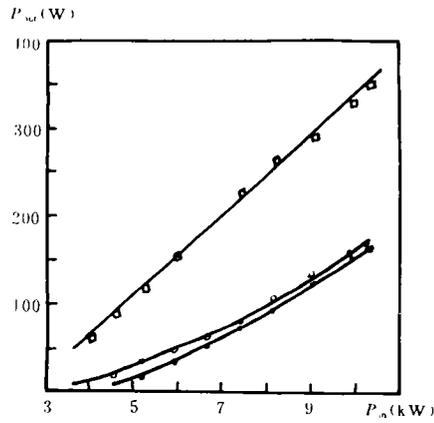


Fig. 6 Output powers of CW lasers vs input power
 ○ - GRMSR ($R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$)
 ● - GRMSR ($R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$)
 □ - URMSR ($R_0 = 80\%$)

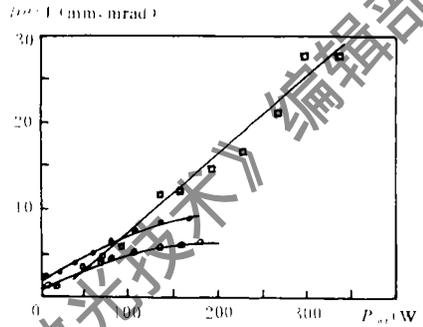


Fig. 7 Beam parameters products ($D\theta/4$) of laser beam vs output power
 ○ - GRMSR ($R_0 = 83\%$, $w_0 = 2.4\text{mm}$)
 ● - GRMSR ($R_0 = 70\%$, $w_0 = 3.0\text{mm}$)
 □ - URMSR ($R_0 = 80\%$)

版权所有 ©

《激光技术》编辑部