

文章编号： 1001-4322(2003)05-0424-03

# 大功率高亮度固体激光腔的选择\*

张光寅, 焦志勇, 颜彩繁, 张晓华

(南开大学 物理科学学院光子学中心, 天津 300071)

摘 要: 分析了大功率激光器可供选择的几种腔型的动力稳定区。并对最近报道的两种固体激光腔型进行了评价,指出了存在的问题,提出采用小曲率半径的凹面镜和一凸面镜构成谐振腔是设计大功率高亮度固体激光器的较好方案。

关键词: 大功率固体激光器; 光学谐振腔; 光束质量; 动力稳定区

中图分类号: TN248 文献标识码: A

大功率(大于千瓦)高亮度( $M^2$  接近 1)的固体激光器是当前全固态激光器研究的前沿课题<sup>[1,2]</sup>。从应用来看,不仅要求固体激光器具有大的激光输出功率,同时还要求输出激光具有好的光束质量,即高亮度。在激光器大功率运行的情况下,不仅要避免在腔内所有光学元件处形成小的基模光斑尺寸,还要保持激光器的适度紧凑性,腔长不能过长。上述诸要求之间,存在着互相制约的关系与矛盾,特别是大功率与高亮度输出之间的矛盾,目前,在国际上还没有圆满地解决,本文将从大功率高亮度固体激光腔的选择入手,提出一个较好的设计方案。

## 1 大功率激光器几种可能腔型的比较

我们先来考察何种腔型适合大功率高亮度固体激光腔的要求。在图 1 中示出几种可供选择的固体激光腔型。其中,  $M_1$  镜有  $M_{11}$  镜(小曲率半径凹面镜)、 $M_{12}$  镜(平面镜)和  $M_{13}$  镜(大曲率半径凹面镜)三种不同的选择。在使热透镜(即激光棒)处有相同的最小基模光斑尺寸的情况下,  $M_{11}$  镜的  $t_{11}$  圆、 $M_{12}$  镜的  $t_{12}$  圆和  $M_{13}$  镜的  $t_{13}$  圆应同切于  $t_1$  变换圆;  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  与  $t_1$  圆的相切点  $G_{11}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  在  $t_1$  圆的圆周上按顺时针方向排序。这些不同选择的  $M_1$  镜均对应于同一个  $|u_1|$  参数(此参数按实现自孔径选基模来确定,图 1 中激光棒孔径取 3.67mm)。  $M_2$  镜可有  $M_{21}$  镜(平面镜)和  $M_{22}$  镜(凸面镜)两种不同的选择,它们均贴近热透镜  $F_t$ , 距离同为  $l_2$ 。它们的圆与  $t_1$  圆分别相交于  $G_{21}$  点与  $G_{22}$  点,沿  $t_1$  圆圆周按顺时针方向的排序为  $G_{21}$   $G_{22}$ , 它们与  $t_1$  圆的另一交点在紧邻热透镜  $F_t$  处。由上述五种反射镜可组成六种腔型:  $M_{13}$ - $M_{21}$ ,  $M_{12}$ - $M_{21}$ ,  $M_{11}$ - $M_{21}$ ,  $M_{13}$ - $M_{22}$ ,  $M_{12}$ - $M_{22}$  和  $M_{11}$ - $M_{22}$ 。按公式<sup>[3]</sup>

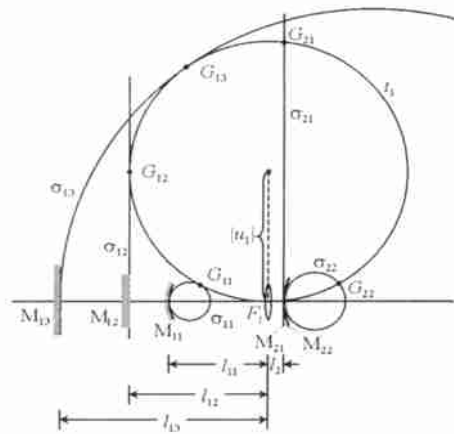


Fig. 1 Compare of six kinds of solid state laser resonator  
图 1 六种不同固体激光腔型的比较

$$u_1 = \frac{l_1(l_1 - R_1)}{R_1}, \quad u_2 = \frac{l_2(l_2 - R_2)}{R_2} \quad (1)$$

可计算出六种腔型的腔参数  $u_1$  和  $u_2$ ;按公式<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \\ \frac{1}{f} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{u_1} \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{u_2} \\ \frac{1}{f} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \end{cases} \quad (2)$$

\* 收稿日期:2002-09-23; 修订日期:2003-01-06  
基金项目:国家自然科学基金资助课题(60078014); 国家 863 计划强辐射重点实验室基金资助课题  
作者简介:张光寅(1932-), 男, 教授, 从事固态光子学和凝聚态光谱研究工作; E-mail: zhanggy@nankai.edu.cn.

可计算出六种腔型的 I,II 动力稳定区的四个边界值:  $1/f_1, 1/f_2, 1/f_3$  和  $1/f_4$ , 见表 1。

表 1 六种腔型的腔参数  $u_1$  和  $u_2$  及它们的两个动力稳定区的四个边界值:  $1/f_1, 1/f_2, 1/f_3$  和  $1/f_4$

Table 1 Resonator parameters  $u_1, u_2$  of six kinds of resonator and their four boundary values:  $1/f_1, 1/f_2, 1/f_3, 1/f_4$  of two dynamical stable region

		the first dynamical stable region		the second dynamical stable region		
$u_1$	$u_2$	$\frac{1}{f_1}$	$\frac{1}{f_2}$	$\frac{1}{f_3}$	$\frac{1}{f_4}$	
$M_{13}-M_{21}$	$-l_{12}$	$-\ l_2$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_{12}}$	$\frac{1}{l_{13}}$	$\frac{1}{l_{13}} - \frac{1}{l_{12}}$
$M_{12}-M_{21}$	$-l_{12}$	$-l_2$	$\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{12}}$	0
$M_{11}-M_{21}$	$l_{12}$	$-l_2$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_{12}}$	$\frac{1}{l_{11}}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_{12}}$
$M_{13}-M_{22}$	$-l_{12}$	$\frac{l_2(l_2 - R_2)}{R_2}$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_{12}}$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$	$\frac{1}{l_{13}} + \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_{12}} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$
$M_{12}-M_{22}$	$-l_{12}$	$\frac{l_2(l_2 - R_2)}{R_2}$	$\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_2} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$	$\frac{1}{l_2} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$
$M_{11}-M_{22}$	$l_{12}$	$\frac{l_2(l_2 - R_2)}{R_2}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_{12}}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$	$\frac{1}{l_{11}} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_{12}} + \frac{R_2}{l_2(l_2 - R_2)}$

在图 2 中示出六种腔型的两个动力稳定区(由阴影表示)及四个边界位置。在图示的计算中取  $l_{13} = 300\text{cm}, l_{12} = 200\text{cm}, l_{11} = 50\text{cm}, l_2 = 1\text{cm}, M_{11}$  镜的曲率半径  $R_1 = 10\text{cm}, M_{22}$  镜的曲率半径  $R_2 = -39\text{cm}$ 。从图中容易看出,  $M_{13}-M_{21}$  腔型的第 I 动力稳定区的右边界在  $1/f_1 = (1/300)\text{cm}^{-1}$  处, 为最低值; 而  $M_{11}-M_{22}$  腔型的第 I 动力稳定区的右边界则在  $1/f_1 = (1/20)\text{cm}^{-1}$  处, 为最大值; 后者为前者的 15 倍。

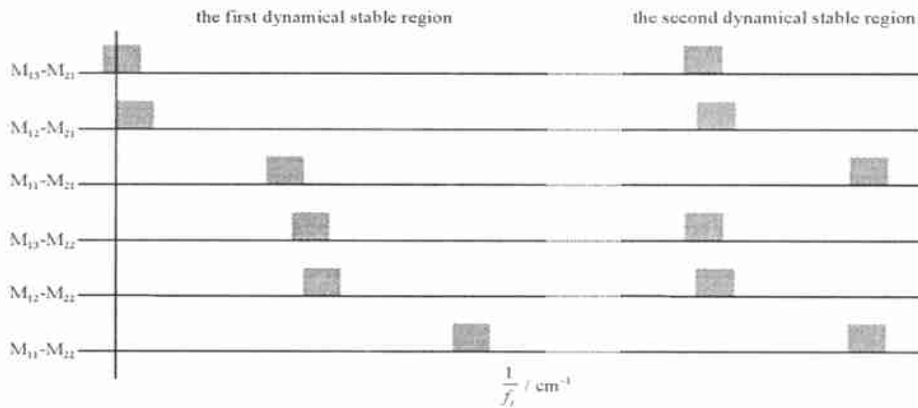


Fig. 2 Dynamical stable regions of six kinds of solid state resonator

图 2 六种不同固体激光腔的动力稳定区(由阴影表示)图

对比这两种腔型可知, 在  $M_{13}-M_{21}$  腔型中, 当  $f_1 = 300\text{cm}$  时, 激光腔振荡; 而在  $M_{11}-M_{22}$  腔型中, 当  $f_1 = 22.2\text{cm}$  时, 激光腔才进入动力非稳定区, 同时, 后一种腔型的腔长又比前一种大大地缩短。由于在同样激活介质截面的情况下, 激光介质的热透镜的光焦度与光泵浦功率成正比<sup>[4]</sup>, 因此, 在后一种腔型中输入的光泵浦功率是前一种腔型的 15 倍, 从而, 可望从激光器中获得同样倍数增大的激光输出功率。若我们进一步缩小  $M_{22}$  镜的曲率半径的绝对值, 同时缩短  $l_{11}$  的长度(以及相应地减小  $M_{11}$  镜的曲率半径, 以使腔参数  $u_1$  保持不变), 激光腔进入动力非稳定区的  $f_1$  值还可以进一步缩短, 输入的光泵浦功率与输出的激光功率均可进一步增大。

然而, 需要指出,  $M_{11}-M_{21}$  腔型仍存在一些难点, 主要是: (1) 动力稳定区较窄, 只能在高光泵浦输入功率的一个窄区内激光腔才能有效运行; (2) 在较高输出功率运行的情况下,  $M_{11}$  镜上的热负荷会过大。为解决难点(1), 我们可以采用 II a 型自适应动力稳定腔<sup>[5]</sup>的方案加以解决, 更详细的分析, 将在后续论文中报道。为解决难点(2), 可采用如图 3 所示的等效镜的方法加以解决, 即利用一平面镜  $M_{11}$  与一凹透镜 F 的组合, 以产生一等效镜  $M'_{11}$ , 来代替



Fig. 3 Diagram of equivalent mirror

图 3 等效镜图示

图 1 中的  $M_{11}$  镜。这时,其  $r_{11}$  圆的直径可以做得很小;同时, $M_{11}$  镜离热透镜  $F_t$  的距离可以取较短值,而凹透镜  $F$  与平面镜  $M_{11}$  上的基模光斑不会太小,能够经受得起较大的热负荷。

从其它腔型可以获得的激光输出功率处于上述两种腔型的中间状况。因此,从上面的对比分析中可知, $M_{11}$ - $M_{22}$ 腔型应是其中最佳的,而  $M_{13}$ - $M_{21}$ 腔型则是最不可取的。

在上述对比分析中,我们没有考虑第 II 动力稳定区的运行。因为该区在上述六种腔型中均处在  $1/f_t$  值的非常高处,激光器实际上无法在该区运行。

## 2 讨论

下面我们来评估一下最近报导的代表当前国际上最高水平的两种大功率高亮度固体激光器中采用的谐振腔<sup>[6,7]</sup>。不难看出,在 E. C. Honea 等的工作<sup>[6]</sup>中是采用了最不可取的  $M_{13}$ - $M_{21}$ 腔型;而在 Y. Hirano 等的工作<sup>[7]</sup>中则是采用了中间状况的  $M_{11}$ - $M_{21}$ 腔型。因此,它们只能靠缩小激光介质的孔径(2mm 或 3mm)来缩小该处的最小基模光斑尺寸,使第 I 动力稳定区的右边界有所延拓,使激光输出功率得以提高。但激光介质孔径的缩小却限制了光泵浦的输入功率与激光的输出功率,同时,易于产生由热应力引起的激光介质的不均匀性。此外,就我们所知,国际及国内还没有超过上面工作的报导,因而,同时顾及高输出功率和光束质量的固体激光器问题仍然是国际上没有解决好的一个重大问题。

## 3 结束语

选择  $M_{11}$ - $M_{22}$ 腔型较之其它腔型有利于增大固体激光器的输入与输出功率,也有助于缩短腔长。

应当指出,在我们的讨论中并未考虑不当泵浦(如各方向泵浦光不均匀等)的方式下的介质的不均匀性问题,仅考虑了泵浦引起的圆形孔径激光介质的理想化热透镜效应,且只考虑了介质孔径限模下的  $TEM_{00}$ 运行(在分析各种腔型时统一的选取了同一  $|u_1|$  参数),以保证激光输出具有  $M^2 \approx 1$  的优良光束质量。若考虑在实际运行时激光介质出现的复杂的不均匀性,会使激光输出的光束质量有不同程度的劣化,但腔型的选择对输入输出功率的限制作用仍是基本相同的,因此,我们的分析结论仍有参考价值。

## 参考文献:

- [1] 王卫民, 高清松, 罗斌, 等. 二极管侧泵浦高效率连续波 10W 单横模激光器[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 57—59. (Wang W M, Gao Q S, Luo B, et al. Study on diode-laser side-pumped CW 10W  $TEM_{00}$  laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1): 57—59)
- [2] 罗亦鸣, 李明中, 秦兴武, 等. 大功率环形 LD 侧面泵浦  $Nd^{3+} : YLF$  激光器的特性[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3): 331—333. (Luo Y M, Li M Z, Qin X W, et al. Study on ring-LD side-pumping solid laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3): 331—333)
- [3] 张光寅, 张潮波, 丁欣, 等. 固体激光腔动力学稳定性的调控[J]. 物理学报, 2002, 51: 253—258. (Zhang G Y, Zhang C B, Ding X, et al. Control on dynamical stability of solid laser resonator. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51: 253—258)
- [4] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 56: 1831—1833.
- [5] 张光寅. 特殊望远镜腔的热聚焦-轴移补偿特性与宽域热稳性[J]. 红外与毫米波学报, 1991, 10: 285—292. (Zhang G Y. The thermofocusing-axial shift compensation character and the thermo-stability in wide regime of the special telescopic resonator. *J Infrared Millim Waves*, 1991, 10: 285—292)
- [6] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-power dual-rod Yb: YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2000, 25: 805—80.
- [7] Hirano Y, Koyata Y, Yamamoto S, et al. 208-W  $TEM_{00}$  operator of a diode-pumped Nd: YAG rod laser[J]. *Opt Lett*, 1999, 24: 679—681.

## Selection of resonator of high power and high brightness solid state laser

ZHANG Guang-yin, JIAO Zhi-yong, YAN Cai-fan, ZHANG Xiao-hua

(Photonics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The dynamic stable regions of several kind of resonator, which can be used in high power laser, have been analyzed. Two kind of solid state laser resonator reported recently have been evaluated, and problems in those resonator have been pointed out. The best design for high power and high brightness solid state laser has been put forward: the best resonator is composed of a short radius concave mirror and a convex mirror.

**Key words:** High power solid state laser; Optical resonator; Beam quality; Dynamic stable region