

文章编号: 0258-7025(2003)11-0977-04

一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔

马海霞, 楼祺洪, 董景星, 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 由于横向抽运的 DPSSL 输出光束在两个垂直方向上有不同的发散角, 把一对平行放置的柱透镜置于谐振腔内, 形成一种可以改善激光器输出光束质量的新型谐振腔。利用 ABCD 传输矩阵理论及等效 G 参数法计算了稳腔范围。从实验上测得横向上光束质量为 $M_x^2 = 1.231$, 而对于简单的平凹腔 $M_x^2 = 2.672$, 大大改善了 DPSSL 在横向上的光束质量因子。

关键词 激光技术; LD 抽运的固体激光器; 光束质量因子; ABCD 矩阵; 等效 G 参数法; 柱透镜

中图分类号 TN 815 **文献标识码** A

A Novel Resonator to Improve the Laser Beam Quality

MA Hai-xia, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A novel resonator with two parallel cylindrical lenses is reported to improve the beam quality factor. The stable cavity condition is obtained by ABCD law and equivalent G parameter method. Experimental results show that the beam quality factor in the horizontal direction $M_x^2 = 1.231$, it is less than half of the $M_x^2 = 2.672$ obtained from the regular stable cavity.

Key words laser technique; DPSSL; beam quality factor; ABCD law; equivalent G parameter method; cylindrical lens

1 引 言

由于激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)效率高、频率稳定、谱线窄、寿命长、体积小,已成为固体激光器发展的主要方向。由于直线形板条状结构可以减小应力引起的聚焦和双折射现象,因而使板条状激光器得到广泛的应用。但是由于其激光介质的非轴对称结构、端面效应、冷却均匀性不够好等因素使得光束在两个垂直的方向上有不同的光斑大小以及不同的光束发散角,光束质量变差。光束质量是激光实际应用中需要加以控制的一项重要指标,激光模式、远场发散角、聚焦光斑尺寸、可聚焦能量等参数都直接影响激光设备的应用效果。

近年来,国内外学术界采用 M^2 作为衡量光束

质量的标准,并对光束质量的控制作了大量的研究^[1,2]。改善光束质量的一般途径有:1) 选用优质激光工作物质,要求其内部折射率、应力等分布均匀;2) 优化抽运方案,使激活体积与抽运光束最佳匹配;3) 合理设计和使用空间滤波器、高斯光阑或高斯反射镜,其物理实质是“滤去”高阶模;4) 光腔的优化设计,压缩发散角或较小光斑尺寸;5) 利用受激布里渊散射(SBS)等相位共轭技术,对腔内的不均匀性有光学补偿作用。上述途径能在一定程度上改善光束质量,但技术复杂度高,实际使用难度大。我们采用在轴对称腔内插入两个非轴对称光学元件(柱透镜)的方法^[3],使其构成一个内置的望远镜系统,进行光腔的优化设计,大大提高了输出光束的光束质量因子(M^2)。

收稿日期: 2002-09-06; **收到修改稿日期:** 2003-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号:19984002)资助项目。

作者简介: 马海霞(1976—),女,山东兖州人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事全固体激光技术方面的研究。E-mail: m0314@163.net

2 新型谐振腔的稳定性分析

由于横向抽运 DPSSL 输出光束在相互垂直的两个方向上往往有不同的发散角,而且在这两个垂直平面内的光强分布都可近似为高斯分布,因此可以把 DPSSL 激光器的输出光束近似为像散椭圆高斯光束。对于 DPSSL 一般在横向上光束质量较差。利用柱透镜在两个方向上的不同变换特性来改善横向上的光束质量。在图 1 所示的平凹谐振腔中插入两块平行放置的柱透镜,使其轴向垂直于光轴。 M_1 为平面输出镜, M_2 为曲率半径为 R 的凹面镜。 C_1, C_2 为柱透镜,其厚度分别为 L_1, L_2 , 折射率为 n_1 。 C_1, C_2 一个面为平面,另一个面的曲率半径分别为 R_1, R_2 。激光介质为 Nd:YAG 板状晶体,长度为 L , 折射率为 n_2 。 C_1 距 M_1 的距离为 S_1 , 距晶体左边缘的距离为 S_2 。 C_2 距晶体右边缘的距离为 S_3 , 距 M_2 的中心距离为 S_4 。由于光束参数在两个方向上无耦合,因此可以在两个方向上分别使用 ABCD 传输矩阵理论,采用等效 G 参数法来计算稳腔范围。

考虑到柱透镜的厚度, C_1 在 yoz 面和 xoz 面内的矩阵可以表示为

$$T_{1y} = \begin{bmatrix} 1 & L_1/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{1x} = \begin{bmatrix} 1 & L_1/n_1 \\ -(n_1 - 1)/R_1 & 1 - (n_1 - 1) \cdot L_1/(n_1 \cdot R_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

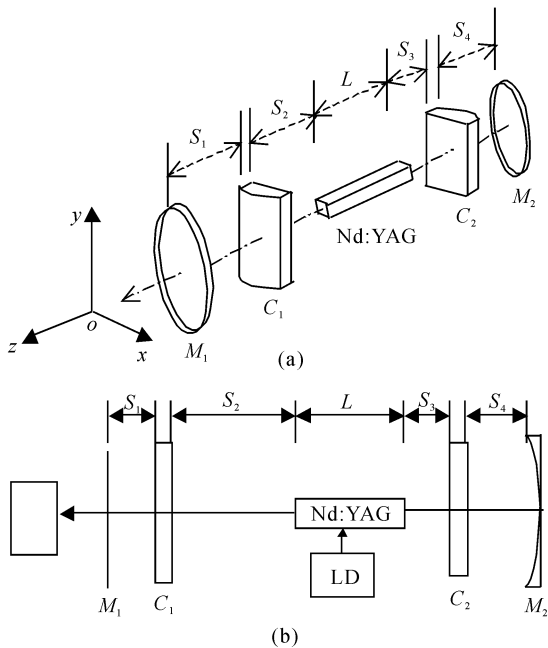


图 1 (a) 新型谐振腔结构示意图;(b) 实验装置图
Fig. 1 (a) Schematics of the new resonator;
(b) Setup of experiment

C_2 在 yoz 面和 xoz 面内的矩阵可以表示为

$$T_{2y} = \begin{bmatrix} 1 & L_2/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{2x} = \begin{bmatrix} 1 - (n_1 - 1) \cdot L_2/(n_1 \cdot R_2) & L_2/n_1 \\ -(n_1 - 1)/R_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

以平面输出镜为参考平面,忽略晶体的热透镜效应,在 yoz 和 xoz 面的 M_1, M_2 间的变换矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{2y} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{1y} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{2x} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{1x} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此在 yoz 面和 xoz 面的 G 参数分别表示为

$$G_{1y} = a_y, G_{2y} = d_y - (b_y/R) \quad (5)$$

$$G_{1x} = a_x, G_{2x} = d_x - (b_x/R) \quad (6)$$

由于在 xoz 和 yoz 平面内,光束进行不同的变换,所以只有当 $0 \leq G_{1y} \cdot G_{2y} \leq 1, 0 \leq G_{1x} \cdot G_{2x} \leq 1$ 同时成立时才满足稳腔条件。激光器在运转时,激光介质因吸收抽运光而发热,同时又因外部冷却使热扩散,从而在介质内形成一定的温度梯度,产生热透镜效应^[4]。热透镜的存在可能导致冷腔条件下处于稳区的谐振腔失稳,因此在激光器设计中必须考虑热透镜的影响。实验中为了保证激光器的稳定运转,使 $G_{1y} \cdot G_{2y} \approx 0.5, G_{1x} \cdot G_{2x} \approx 0.5$ 。

3 实验装置与测量

实验装置采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG 板的方式。抽运光源位于激光介质板其中一个侧面的中部,两者的长轴方向一致,并且 LD 紧贴介质板。Nd:YAG 板尺寸为 $3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 折射率 $n_2 = 1.825$ 。谐振腔为平凹腔,凹镜 $R = 1000 \text{ mm}$, 激光从平镜处输出, $T = 6\%$ 。在激光介质板条除抽运面以外的三个侧面上包上一定厚度的铜块热沉,并用循环水冷却。为了让介质板和铜块充分接触,两者间夹了质地很软、导热性能很好的钢片薄膜。按图 1 所示,在平凹腔中插入两块平行放置的柱透镜,构成一种新型谐振腔。柱透镜的参数 $R_1 = 29.83 \text{ mm}, L_1 = 5.9 \text{ mm}, R_2 = 12.6 \text{ mm}, L_2 = 3.7 \text{ mm}, n_1 = 1.506$ 。LD 最高输出功率约为 30 W 。

用移动狭缝法测量束宽,测量装置如图 2 所示。测量所用狭缝宽度应不大于被测光束宽度的 1/20。使用的光电探测器为 LPE-I 型激光功率能量计,最小量程为 0.1 mW (mJ),最大量程为 5000 mW (mJ)。实验中所测光为连续激光,选择功率档。将狭缝固定在可以精确微调的移动平台上,调节精度为 0.05 mm。通过调节测微螺旋,使狭缝在光场的横向和纵向上移动,移动的步长为 0.1 mm。

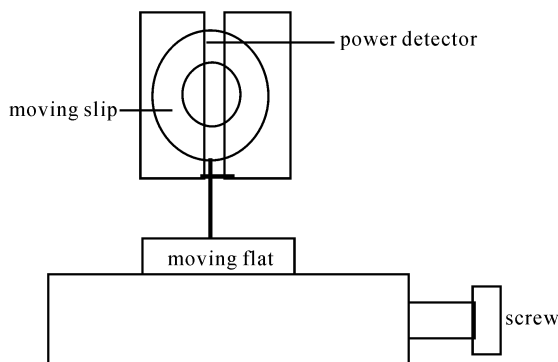


图 2 测束宽装置示意图

Fig. 2 Experimental setup of measuring beam-width

此时,探测器测出的透射激光功率(能量)为狭缝位置的函数,由测量透过峰值功率 13.5% 的两个位置便可确定束宽。对于平凹式的谐振腔,激光束光腰在平面输出镜处。我们拟采用两点法,利用光束传播方程 $w^2 = w_0^2 + \theta^2 \cdot z^2$ 来计算 M^2 。其中 z 为狭缝距离平面输出镜的距离, w_0 为束腰, θ 为光束发散角, w 为距离 z 处的束宽。利用 $M^2 = \pi\theta w_0/\lambda$ 即可求得 M^2 。

4 实验结果

对于简单的平凹腔,当腔长为 245 mm 时, M_1 距离晶体右边缘为 117 mm, M_2 距离晶体左边缘为 113 mm。当输出功率为 100 mW 时,分别在 130 mm 和 480 mm 测得其束宽 $w_{1x} = 0.706$ mm, $w_{1y} = 0.414$ mm, $w_{2x} = 0.934$ mm, $w_{2y} = 0.672$ mm, 在水平方向上其功率分布如图 3 所示。

用两点法求得在两个垂直方向上的光束质量因子 $M_x^2 = 2.672, M_y^2 = 1.306$, 水平方向上光束发散半角为 1.322 mrad。

当在平凹腔内插入两块平行放置的柱透镜时,构成一种新型谐振腔,参数如下: $S_1 = 70$ mm, $S_2 = 41.1$ mm, $S_3 = 40.3$ mm, $S_4 = 69$ mm。这时由等效 G 参数法得知 $G_{1y} \cdot G_{2y} = 0.50, G_{1x} \cdot G_{2x} =$

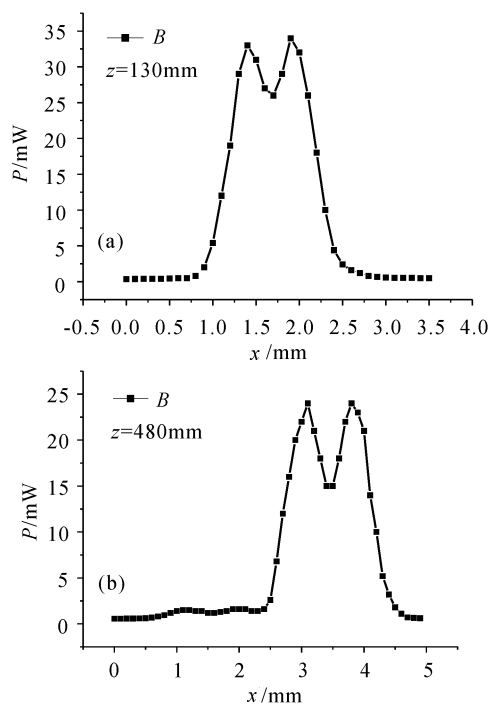


图 3 简单平凹腔的横向功率分布

Fig. 3 Horizontal power distribution of the regular plane concave mirror

0.53。同样在输出功率为 100 mW 时分别在 130 mm 和 1670 mm 时测得其束宽 $w_{1x} = 0.508$ mm, $w_{1y} = 0.383$ mm, $w_{2x} = 1.488$ mm, $w_{2y} = 2.128$ mm。我们只给出在水平方向上两点的水平功率分布图 4。

用两点法求得在两个垂直方向上的光束质量因子 $M_x^2 = 1.231, M_y^2 = 1.286$ 。其水平光束发散半角为 0.84 mrad。

在上述两种情况下,在距离平面输出镜为 665 mm 处观察到的光斑形状如图 5 所示。

实验中,由于对提高激光器输出功率和转换效率起关键作用的因素,如激光晶体的最佳长度、输出耦合镜的最佳透过率等都未进行仔细的研究,因此输出功率较低。如简单的平凹腔,输出功率为 500 mW,而同样条件下的新型谐振腔输出功率为 300 mW。为了便于比较,对于简单的平凹谐振腔和改进的新型谐振腔,我们在相同的输出功率下比较两者的光束质量因子及光束发散角。由实验结果可知,新型谐振腔的横向功率分布优于简单平凹腔的横向功率分布,水平发散角小,模式特性好,曲线近高斯型,在同样距离处观察到的光斑形状在横向上明显减小。

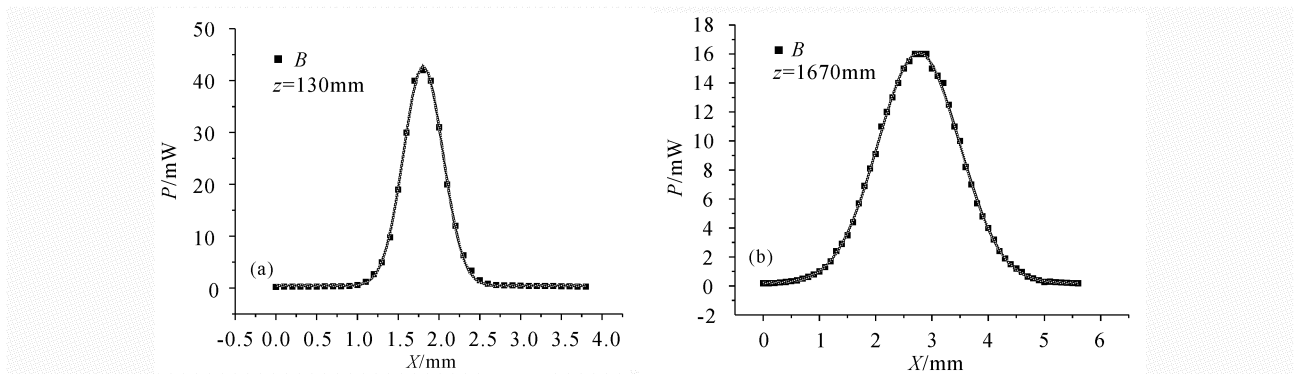


图 4 新型谐振腔的横向功率分布

(■为实验点,曲线为高斯拟合曲线)

Fig. 4 Horizontal power distribution of the new resonant cavity

(■ shows the experimental point, curve is the Gaussian fit curve)

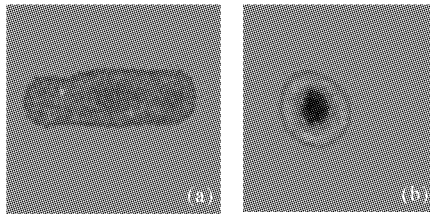


图 5 (a)简单平凹腔的光斑分布;

(b) 新型谐振腔的光斑分布

Fig. 5 Beam profiles for regular stable resonator (a) and novel resonator (b)

5 讨 论

从以上结果可见,当在腔内插入两块平行放置的柱透镜时,就构成了一个内置的望远镜系统,利用其扩束准直作用,使得水平方向上的光束分布特性明显变好。即使在远场区域,光束的发散角也不大,模式特性好,曲线近高斯分布。只要这种新型谐振腔处于稳腔范围,就能够很好地起到改善输出光束质量的作用。这种新型谐振腔相对于简单的平凹

腔,功率有一定损耗^[3],但是只要柱透镜的厚度不大,并且冷却良好时,能够避免或尽量减少这些效应。由于这种新型腔结构没有随晶体的热效应发生动态的改变,因此受晶体热效应的影响较明显,只有在热效应不是很明显时才可以很好地改善光束质量。

参 考 文 献

- 1 Baida Lü, Bangwei Cai, Guoying Feng *et al.*. Beam quality improvement of slab lasers [C]. *SPIE*, 1992, **1813**:265~273
- 2 Cheng Yong, Sun Bin, Wang Xiaobing *et al.*. Novel approach to improve laser beam quality and stability [J]. *Chinese Journal of Quantum Electron.* (量子电子学报), 1999, **16**(3):217~220 (in Chinese)
- 3 J. H. Garcia-López, V. Aboites, A. V. Kir'yanov *et al.*. Experimental study and modeling of a diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser [C]. *SPIE*, 2001, **4595**:310~318
- 4 Lü Baida. Laser Optics [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 276 ~ 291, 361 ~ 363 (in Chinese)