

# 激光二极管抽运四片串联 Nd:YAG 薄片激光器

刘洋 王超 唐晓军 徐璠婧 梁兴波 刘刚 赵鸿

(华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 针对四薄片串联结构, 利用 ABCD 传输矩阵方法对谐振腔进行优化设计。采用四片 Nd:YAG 薄片串联, 谐振腔采用双凹对称腔, 实现了 2.15 kW 的激光输出, 验证了激光二极管(LD)抽运薄片激光器的定标放大能力。

**关键词** 激光器; 薄片激光器; 谐振腔设计; Nd:YAG 晶体; 定标放大

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1202007

## Laser Diode-Pumped Four Nd:YAG Disks Laser

Liu Yang Wang Chao Tang Xiaojun Xu Liujing Liang Xingbo

Liu Gang Zhao Hong

(Science and Technology on Solid-State Lasers Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The resonator is optimally designed for the construction of four disks in series, using the method of ABCD transmission matrix. With four Nd:YAG disks in the concave-concave symmetrical resonator, the output power of 2.15 kW is obtained, which proves that the laser diode-pumped disk laser has the ability of output scaling and amplification.

**Key words** lasers; disk laser; resonator design; Nd:YAG crystal; output scaling and amplification

**OCIS codes** 140.3410; 140.3460; 140.3480; 140.3530

## 1 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPL)由于其独特的优势被广泛应用于工业、国防、科研和医疗等多个领域,特别是高功率、高光束质量的 DPL 有着更广阔的应用前景。

按照增益介质的形状分类,LD 阵列抽运的固体激光器主要可以分为圆棒状激光器、板条激光器、薄片激光器和光纤激光器<sup>[1]</sup>。其中薄片激光器是一种很有潜力的高功率激光器,由于其轴向准一维的温度分布和较好的散热效果可以有效地减小热透镜效应,从而薄片激光器在获得高功率激光输出的同时,保持高效率和高光束质量<sup>[2~4]</sup>。目前多种结构的薄片状激光器已经实现了高平均功率和极好的光束质量的激光输出,最重要的是该结构激光器具有功率定标放大能力的同时还能够保持优良的光束质量<sup>[5~9]</sup>。

本文针对四片薄片串联折叠腔,利用 ABCD 传

输矩阵对谐振腔进行计算、分析,得到利用双凹对称腔结构有利于激光功率抽取的结论,进而验证了 LD 抽运薄片激光器的定标放大能力。

## 2 谐振腔设计

四片串联的折叠谐振腔如图 1 所示,其中 R1, R2 为谐振腔的输入、输出腔镜, M1~M4 为薄片增益介质。通过实验测量了薄片晶体热透镜焦距随抽运功率的变化关系,得到当抽运功率为 2.4 kW 时,对应的热透镜焦距为 -5 m。

四薄片串联折叠腔可以等效为图 2 所示的直腔。其中  $d_1 = d_5 = 200$  mm,  $d_3 = 600$  mm,  $d_2 = d_4 = 400$  mm, 总腔长为 1800 mm, 四薄片呈对称排布。 $f_1, f_2, f_3, f_4$  分别为各薄片对应的热透镜焦距,薄片的厚度远小于谐振腔长度,将它们视为理想的薄透镜。由于四片薄片各参数和抽运功率均相同,  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_T = -5$  m, 以镜 R1 作为参考,

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-31

作者简介: 刘洋(1985—),男,硕士,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: hench0594@163.com

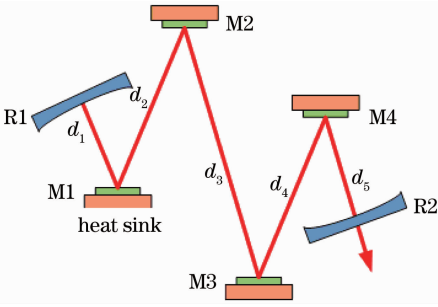


图 1 四片串联薄片激光器实验示意图  
Fig. 1 Experimental setup of LD pumped four Nd:YAG disks laser

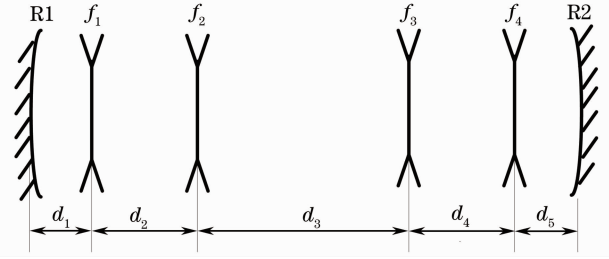


图 2 LD 抽运四片串联薄片等效直腔  
Fig. 2 Equivalent resonator of LD pumped four Nd:YAG disks laser

四薄片串联单程传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

谐振腔对应的  $G$  参数为  $G_1 = a - b/R_1, G_2 = d - b/R_2$  其中  $R_1, R_2$ , 分别为全反镜和输出镜的曲率半径。谐振腔稳定条件为  $0 < G_1 G_2 < 1$ 。

腔内的往返传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d & b \\ c & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}. \quad (2)$$

镜 M1 上的基模高斯光束的束宽为

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \sqrt{\frac{G_2}{G_1(1-G_1 G_2)}} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{2B}{\sqrt{4-(A+D)^2}}. \quad (3)$$

由于薄片的厚度远小于谐振腔长度, 近似求得谐振腔的基模体积和多阶模体积分别为

$$V_{00} = 2\pi(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)h, \quad (4)$$

$$V_{nm} = 2\pi \sqrt{(2m+1)(2n+1)} \times$$

$$(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)h, \quad (5)$$

式中  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  分别为四薄片上的基模光斑半径,  $h$  为薄片晶体厚度。

选取腔内其他点作为参考位置可以得到腔内任意位置处的基模高斯光束的束宽, 计算了平-凹腔和双凹腔对应不同腔参数的 4 种腔型的腔内基模振荡光包络曲线, 其中平-凹腔的凹面镜为全反镜, 平面镜为输出镜; 双凹对称腔的全反镜和输出镜均为凹面镜, 分别对应图 2 中的 R1 和 R2。图 3 为计算得到的平-凹 3 m、平-凹 2.5 m、凹 3 m-凹 3 m 和凹 2.5 m-凹 2.5 m 4 种腔型腔内基模振荡光包络曲线。利用(4),(5)式可以计算得到 4 种腔型的基模和多阶模模式体积, 图 4 为四种腔型模体积归一化计算结果。

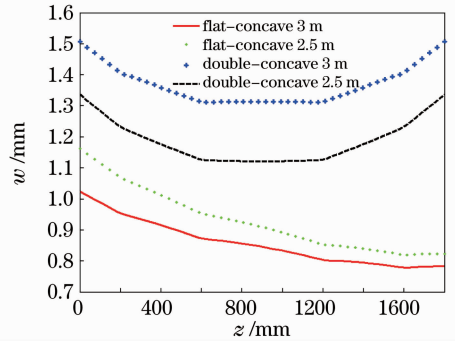


图 3 4 种腔型腔内基模光斑的大小  
Fig. 3 TEM<sub>00</sub> radius in four different resonators

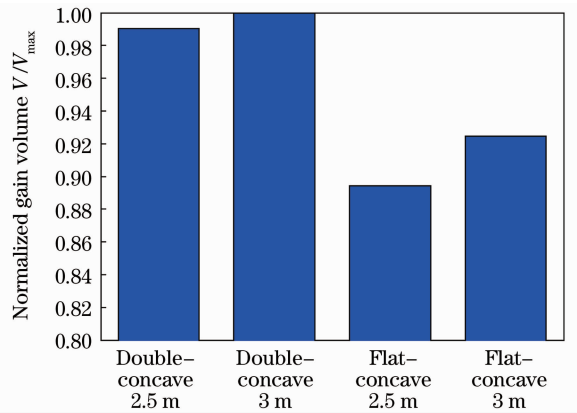


图 4 4 种腔型模体积的比较  
Fig. 4 Gain volume comparison of four different resonators

从图 3、4 可以看出, 在四片薄片串联的谐振腔中采用对称的双凹对称腔可以得到较大的模式体积, 更有利于激光功率的提取。下面考虑热透镜焦距变化时, 上面两种双凹对称腔的稳定性。

图 5 为凹 3.0 m-凹 3.0 m 和凹 2.5 m-凹 2.5 m 两种腔型的  $G$  参数随热透镜焦距的变化情况。从图中可以看出当热透镜焦距逐渐变短时, 凹 3.0 m-凹

3.0 m 腔由稳腔向非稳腔过渡,而凹2.5 m-凹2.5 m 谐振腔一直工作在稳区范围内。

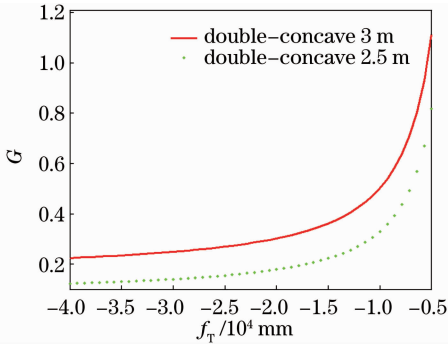


图 5 两种双凹对称腔不同热透镜焦距下的 G 参数  
Fig. 5 G parameters of 2 double-concave resonators as a function of thermal lens

### 3 实验研究

四片薄片串联实验装置照片如图 6 所示,增益介质为 4 块 50 mm×50 mm×1.3 mm 的 Nd:YAG 薄片,掺杂原子数分数为 1.0%。薄片增益介质与微通道水冷热沉焊接在一起实现薄片的有效散热。采用四通抽运耦合方式保证抽运光的充分吸收,抽运光路和激光光路在两个正交的平面上,4 个抽运模块分别从薄片的下侧以 45°角抽运增益介质表面,抽运光经晶体后端面反射到凹面的 808 nm 全反射镜后再次入射到增益介质。整个抽运光主要光强的分布形状接近方形,方形增益介质的边缘为被抽运光填充均匀,抽运光的耦合效率达到 90% 以上。

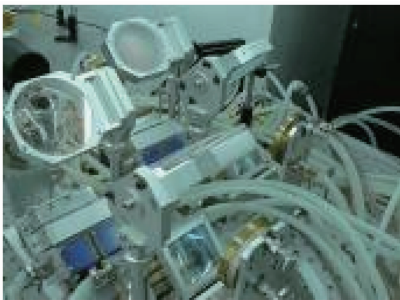


图 6 实验装置照片

Fig. 6 Picture of the experimental setup

首先进行了单薄片以及双薄片串联谐振腔实验研究,分别得到了 718 W 和 1.32 kW 的激光输出,输出与输入功率变化曲线如图 7、8 所示,对应的光-光转换效率分别为 34.9% 和 32.1%。为了进一步验证薄片增益模块的定标放大能力,搭建了四块薄片串联的实验装置,采用双凹对称腔结构补偿发散

的热透镜效应,由上述谐振腔计算得到的结论,选用输出、输入镜的曲率半径均为 2.5 m,输出镜的透射率为  $T=5%$ 。实验中,进行了激光器在不同抽运光注入条件下激光输出特性的研究,得到了激光器不同条件下的输出功率和单脉冲能量如图 9、10 所示。

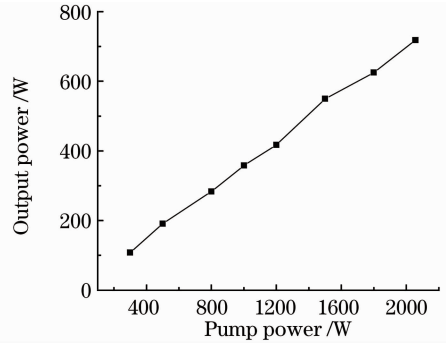


图 7 单薄片输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 7 Output power as a function of pump power of single disk

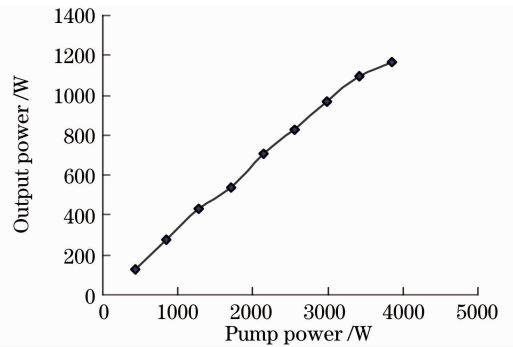


图 8 双薄片输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 8 Output power as a function of pump power of two disks

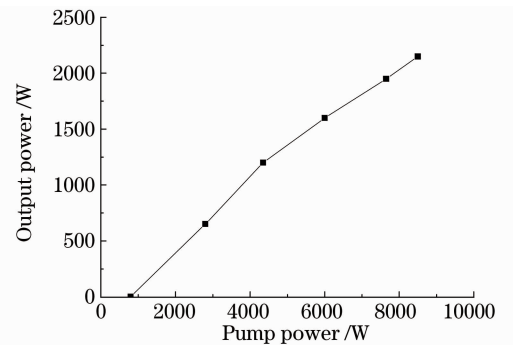


图 9 四片串联输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 9 Output power as a function of pump power of four disks

可以看出,随注入抽运功率的提高,激光器的输出功率随之增高。当抽运电流为 120 A,抽运脉宽为 200  $\mu\text{s}$ ,抽运频率为 1000 Hz,即抽运的占空比为 20%时,得到最高输出功率为 2.15 kW,对应的光-

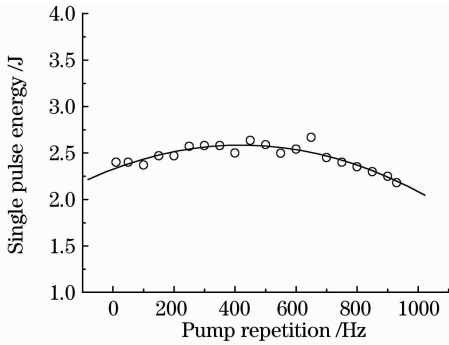


图 10 四片串联单脉冲能量随抽运重复频率的变化

Fig. 10 Single pulse energy as a function of pump power of four disks

光转换效率为 26.14%，与单薄片及双薄片实验结果相比较，效率有一定的下降。分析原因主要是腔内热透镜效应的加剧，以及腔长的增加等因素导致效率的下降，但实验结果从整体趋势上体现了 LD 抽运薄片激光器具有较好的定标放大能力。

## 4 结 论

针对四薄片串联的谐振腔结构，利用 ABCD 传输矩阵方法对谐振腔进行了优化设计；利用双凹对称腔结构，四薄片串联，在抽运电流为 120 A，抽运脉宽为 200 μs，抽运频率为 1000 Hz 条件下，实现了 2.15 kW 的激光输出。从而验证了全固态薄片增益模块具有较好的定标放大的特性。下一步的研究工作可以利用非稳腔结构和腔内自适应光学系统提

高输出激光的光束质量。

## 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2002  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002
- 2 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **7**(36): 1605~1618  
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **7**(36): 1605~1618
- 3 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. *Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 4 Alan J. Kemp, Gareth J. Valentine, David Burns. Progress towards high power, high brightness neodymium based thin-disk lasers[J]. *Prog. in Quantum Electron.*, 2004, **28**(6): 305~344
- 5 Li Qiang, Cai Yanfang, Jiang Menghua *et al.*. Laser diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1793~1797  
李 强, 蔡艳芳, 姜梦华 等. 激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1793~1797
- 6 Giesen. Results and scaling laws of thin disk lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 212~227
- 7 Jason P. Machan, William H. Long, Jr. James Zamel *et al.*. 5.4 kW diode-pumped, 2.4× diffraction-limited Nd:YAG laser for material processing[C]. *Advanced Solid-State Lasers Conference*, 2002 Technical digest. 549~551
- 8 Vetrovec John. Active mirror amplifier for high average power [C]. *SPIE*, 2001, **4270**: 45~55
- 9 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 37~40  
姚震宇, 蒋建锋, 涂 波 等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 37~40

栏目编辑: 宋梅梅