

平均功率 3000 W 的 MOPA 脉冲 Nd:YAG 激光器

姜梦华 李强 雷 雷 雷 惠勇凌 冯 驰 孙 哲

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了一种高平均功率的脉冲 Nd:YAG 激光器。对四棒振荡两棒放大的主振荡功率放大器(MOPA)结构中晶体棒的失调角度允许范围进行了理论分析,并与六棒串接谐振腔结构中晶体棒失调角度允许范围进行比较。由比较结果可知,MOPA 结构降低了晶体棒的串接精度要求,在相同的失调角度下,光轴的变化量小于腔内多棒串接谐振腔,有利于提高多棒脉冲激光器的安全性能,实现高平均功率、高脉冲能量输出。实验中激光器采用四棒振荡两棒放大结构,调整每根晶体棒的失调角度到允许范围内,在输入电功率 87 kW,占空比 17%时,最高输出平均功率为 3011 W,峰值功率 17.7 kW,最高单脉冲能量为 67 J,光束参数乘积为 25.2 mm·mrad。电光转换效率 3.46%,长时间工作不稳定性小于 2%。

关键词 激光器;脉冲激光器;Nd:YAG 晶体;主振荡功率放大器结构;灯抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102006

A Pulsed Master-Oscillator Power-Amplifier Nd:YAG Laser with Average Power of 3000 W

Jiang Menghua Li Qiang Lei Hong Hui Yongling Feng Chi Sun Zhe

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A pulsed Nd:YAG laser with high average power is presented. The influence of offset angle of rods in six rods series connection resonator and the master oscillator power-amplifier (MOPA) system consisting of four rods oscillator and two rods amplifier are investigated theoretically. And the tolerances of offset angle are compared. It can be seen from the investigation results that MOPA system reduces the requirement of precision of series connection. With the same offset angle, the deviation of optical axis of the MOPA system is less than that of six rods resonator. It is helpful to improve the security performance of multi-rod pulsed laser, and obtain high average output power and high pulse energy. A MOPA system with four rods oscillator and two rods amplifier has been used in the experiment, and the offset angle of all rods is adjusted in the tolerance. With input electric power of 87 kW and a duty cycle of 17%, a maximum average output power of 3011 W, a peak power of 17.7 kW, a maximum single pulse energy of 67 J and a beam parameters product of 25.2 mm·mrad have been obtained. The electro-optical conversion efficiency is 3.46%, and instability of the laser is less than 2%.

Key words lasers; pulsed laser; Nd:YAG crystal; master oscillator power-amplifier system; lamp pumped

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.3538; 140.3580

1 引言

脉冲固体激光器在切割、打孔、焊接等工业加工领域和实验研究中有着广泛的用途^[1~4]。输出功率是影响激光器应用范围的一个重要因素^[5]。固体激光器由于单棒输出功率的限制^[6],通常采用腔内多

棒串接^[7]或者振荡-放大的主振荡功率放大器(MOPA)结构^[8]实现高功率输出。谐振腔内多棒串接方案具有结构简单,理论上输出功率与棒数成比例地增加等优点,是实现高功率、高光束质量激光输出的一种常用方案^[9,10]。但在实际应用中随着腔内

收稿日期: 2011-06-28; 收到修改稿日期: 2011-08-02

作者简介: 姜梦华(1981—),男,博士研究生,主要从事大功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: jmenghua@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李强(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光技术与加工系统等方面的研究。

E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

串接晶体棒数量的增加,谐振腔腔长变长,各晶体棒调整精度、对准误差等因素对激光器安全稳定运行的影响越来越明显;晶体棒的热焦距差异也造成动态工作点多次通过非稳区,影响激光器的输出功率^[11]。MOPA结构降低了上述问题对激光器的影响,是一种实现高亮度激光输出的有效方式^[12,13]。对于多棒串接的脉冲激光器,激光峰值功率高、单脉冲能量大,系统的光学元件和介质膜一般都工作在高能量密度和高功率密度条件下,容易引起损伤,因而对晶体棒的对准精度要求高,腔内晶体棒的数量也受到限制。为了达到脉冲激光器的高对准精度要求,提高激光器工作的安全性,晶体棒失调允许范围是实验研究中必须确定的参数,但很少有关这方面的研究内容报道。本文采用增广传输矩阵,对晶体棒失调角度的影响进行了理论分析,对比了四棒串接两棒放大的MOPA结构和六棒串接谐振腔中,晶体棒的角度失调允许范围。在理论分析的基础上,

采用MOPA结构实现了平均功率为3011 W的脉冲激光输出。

2 脉冲Nd:YAG激光器结构

MOPA结构脉冲Nd:YAG激光器结构示意图如图1所示,为了使激光器具有较高的效率和较好的安全性,采用谐振腔内四棒串接作为振荡级,腔外两根晶体棒5和棒6作为放大级。谐振腔采用对称平平腔结构,谐振腔两端靠近晶体棒的位置分别放置光阑对高阶模进行限制。全反射镜(HR)与晶体棒1相邻端面间距为 d_1 ,棒相邻端面间距分别为 d_2 、 d_3 、 d_4 ,输出镜与棒4相邻端面间距为 d_5 ,输出镜与棒5间距为 d_6 ,棒5与棒6间距为 d_7 。放大级晶体棒5和棒6的光入射端分别放置光阑对晶体棒进行保护。晶体棒的等效热焦距分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6 ; h 为棒端面与主面间距离, $h = l/(2n)$ ^[14]; l 为晶体棒的几何长度, n 为晶体棒的轴向折射率。

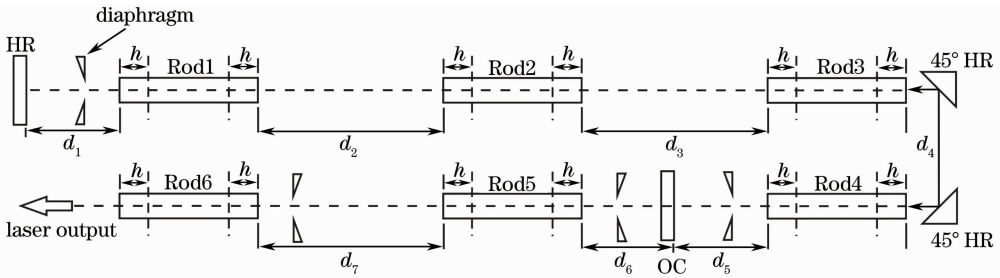


图1 MOPA结构激光器示意图

Fig.1 Schematic setup of the MOPA laser

3 晶体棒失调角度允许范围的理论分析

对于MOPA结构的激光器,谐振腔内的晶体棒失调量是引起光轴变化的主要因素。放大级晶体棒通常根据振荡级输出激光的方向进行调整,并且由于激光在晶体棒中只通过一次,因而只会对最终输出激光的方向造成一定影响。考虑到多棒串接时通常采用标准模块,横向位置相对容易控制,角度失调是晶体棒的主要失调量。利用增广的 4×4 矩阵描述失调光学系统的传输矩阵^[15],对于图1中所示的MOPA系统,振荡级谐振腔的往返传输矩阵可表示为

$$M = M_{\text{BW}} \cdot M_{\text{FW}} = \begin{pmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 与通常所用的 2×2 传输矩阵相同, E 、 G 包含系统的位置失调量, F 、 H 包含系统的角度失调量。 M_{FW} 和 M_{BW} 分别表示谐振腔正向和反向的单程传输矩阵:

$$M_{\text{FW}} = M_{d_5} \cdot M_{h_4} \cdot M_{f_4} \cdot M_{h_4} \cdot M_{d_4} \cdot M_{h_3} \cdot M_{f_3} \cdot M_{h_3} \cdot M_{d_3} \cdot M_{h_2} \cdot M_{f_2} \cdot M_{h_2} \cdot (2)$$

$$M_{d_2} \cdot M_{h_1} \cdot M_{f_1} \cdot M_{h_1} \cdot M_{d_1} \cdot M_{\text{HR}},$$

$$M_{\text{BW}} = M_{d_1} \cdot M_{h_1} \cdot M_{f_1} \cdot M_{h_1} \cdot M_{d_2} \cdot M_{h_2} \cdot M_{f_2} \cdot M_{h_2} \cdot M_{d_3} \cdot M_{h_3} \cdot M_{f_3} \cdot M_{h_3} \cdot (3)$$

$$M_{d_4} \cdot M_{h_4} \cdot M_{f_4} \cdot M_{h_4} \cdot M_{d_5} \cdot M_{\text{OC}},$$

式中 M_{HR} 、 M_{OC} 分别表示全反射镜和输出镜的传输矩阵; M_{f_N} 表示晶体棒 N 的等效热透镜传输矩阵; M_{h_N} 表示晶体棒 N 的端面到主面间的传输矩阵; $N=1,2,3,4$ 。 M_{d_K} 表示自由空间 d_K 的传输矩阵, $K=1,2,\dots,5$ 。

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{f_N} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_N} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
\mathbf{M}_{l_N} &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{l_N}{2n} & 0 & \left(1 - \frac{1}{n}\right) \frac{l_N}{2} \epsilon'_N \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
\mathbf{M}_{d_K} &= \begin{pmatrix} 1 & d_K & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
\mathbf{M}_{HR} = \mathbf{M}_{OC} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)
\end{aligned}$$

式中 f_N 为晶体棒 N 的等效热焦距, l_N 为晶体棒 N 的长度; ϵ'_N 为晶体棒 N 的角度失调量; d_K 为自由空间 d_K 的长度; θ 为谐振腔模体积最大时腔镜的倾斜角度, 这里假设全反镜和输出镜的倾斜角度相同。对于往返传输矩阵, 由输出镜返回的光束经过晶体棒时, 相对于光束传输方向, 晶体棒的角度失调方向与之前经过时的方向相反, 因而 \mathbf{M}_{bw} 中角度失调量的符号发生变化。

谐振腔光轴满足传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 x_0 、 θ_0 为沿光轴传输的光线在全反镜上的位置和角度, 对传输矩阵(5)式进行求解可得

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{E - D \cdot E + F - D \cdot F + B \cdot G + B \cdot H}{-1 + A + B \cdot C + D - A \cdot D}, \\ \theta_0 = -\frac{C \cdot E + C \cdot F + G - A \cdot G + H - A \cdot H}{-1 + A + B \cdot C + D - A \cdot D}. \end{cases} \quad (6)$$

将(2)、(3)和(4)式分别代入(1)式, 可以得出振荡级四棒串接谐振腔中 x_0 、 θ_0 与失调角度的关系, 然后将计算结果再代入(2)、(3)式经传输矩阵变换, 即可得到沿光轴传输的光线在腔内其他位置处的位置和角度。

当晶体棒失调角度不满足串接要求时, 光轴偏移使光束边缘超出晶体棒端面, 导致晶体棒损坏。

为确定谐振腔中晶体棒的失调角度允许范围, 对高抽运功率下失调角度对光轴的影响进行模拟, 低抽运功率时光束半径较大, 选择合适的光阑孔径可以起到保护晶体棒的作用。以 12 kW 注入功率时, 晶体棒半径减去棒端面多模光束半径之差的 50% 作为光轴变化的最大允许范围。经计算, 12 kW 注入功率时晶体棒端面的多模高斯光束半径为 3.72 mm, 即光轴变化的最大允许范围为 0.14 mm。

模拟中 Nd:YAG 晶体棒尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 振荡级谐振腔采用对称放置, 棒镜间距为 210 mm, 棒间距等于棒镜间距的 2 倍。当输入电功率 12 kW 时, 实验测量 Nd:YAG 晶体棒的热焦距 $f=300 \text{ mm}$ 。

以所有晶体棒不失调时的光轴作为理想光轴, 沿光束传输方向, 取相对于理想光轴的顺时针方向作为失调角度的正方向。则每根晶体棒的失调角度有 3 种可能: 正方向角度失调、不失调和负方向角度失调。对于四棒串接谐振腔, 共有 81 种可能的失调角度排列方式。假设晶体棒失调时, 角度失调量大小相等, 模拟所有的排列中, 晶体棒端面的光轴最大偏移量随角度失调量的变化, 模拟结果如图 2 所示。采用同样方法, 对六棒串接谐振腔的失调角度允许范围进行模拟。对于六棒串接谐振腔, 共有 729 种可能的角度失调排列方式。在相同的模拟条件下, 晶体棒端面的光轴最大偏移量与角度失调量关系如图 3 所示。

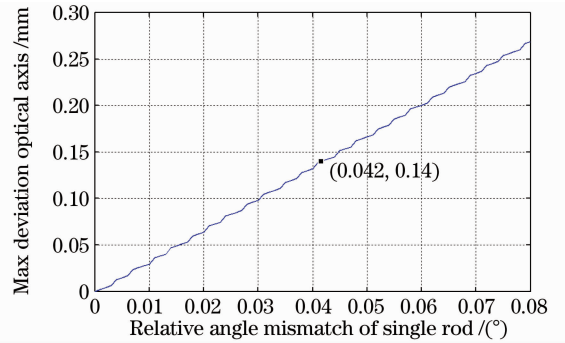


图 2 四棒串接谐振腔最大光轴偏移量与晶体棒角度失调量的关系

Fig. 2 Max deviation of optical axis in four-rod resonator versus offset angle of rods

从图 2 和图 3 的模拟结果可以看出, 四棒串接谐振腔的角度失调允许范围比六棒串接谐振腔的角度失调允许范围大。当晶体棒的角度失调量小于等于 0.042° 时, 所有排列的光轴最大偏移量都在 0.14 mm 之内, 而六棒谐振腔失调角度小于等于

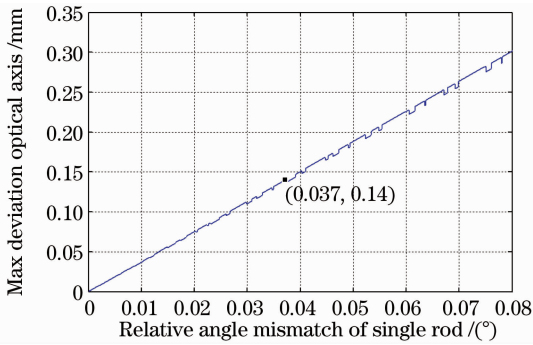


图 3 六棒串接谐振腔最大光轴偏移量与晶体棒角度失调量的关系

Fig. 3 Max deviation of optical axis in six-rod resonator versus offset angle of rods

0.037°才可以达到同样的目标。在相同的角度失调量下,六棒串接谐振腔的光轴偏移量更大。例如在失调角度为 0.03°时,四棒串接谐振腔光轴偏移量为 0.095 mm,而六棒串接谐振腔的光轴偏移量为 0.114 mm,光轴偏移量增加了 20%。因而采用腔内四棒串接腔外两棒放大的 MOPA 结构,降低了晶体棒的串接精度要求,相同的失调角度引起的光轴变化量更小,有利于提高激光器工作的安全性。

除此之外,四棒串接加两棒放大的 MOPA 结构,热焦距匹配只需考虑串接四棒热焦距,与六棒串接相比,更容易实现热焦距匹配。

4 实验及结果

Nd:YAG 晶体棒的抽运模块结构相同,聚光腔采用陶瓷漫反射腔。晶体棒尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,掺杂质量分数为 1%,端面镀 1064 nm 的增透膜;每根晶体棒采用双氙灯抽运,激光电源对每根氙灯的最大注入功率为 8 kW。激光腔采用水冷全腔冷却,温度 20 °C,温度范围控制在 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。每个激光模块的输出功率、热焦距都采用对称平平腔进行测试^[16],选择性能相近的模块用于组装 MOPA 激光器。

将 He-Ne 激光扩束,再用小孔光阑取出一束发散角很小的光束作为串接指示光。用于串接振荡级谐振腔的 4 个激光模块按图 1 中所示分两排放置,观察晶体棒端面反射的 He-Ne 激光相对于光阑小孔的偏移距离,根据距离计算晶体棒的失调角度,仔细调整激光模块,使 4 根晶体棒达到失调角度小于等于 0.042°要求。分别将两排激光模块调整好,利用经过棒 1、棒 2 和棒 3 的 He-Ne 激光调整两个 45°全反射镜,调整后再利用经过棒 4 的 He-Ne 激光进

行修正微调,经多次修正后两个 45°全反射镜调整好。

振荡级谐振腔采用对称平平腔,棒间距 2 倍于棒镜间距 d , $d=210 \text{ mm}$;为保护晶体棒及限制输出激光模式,谐振腔两端分别放置两个直径为 $\phi 7.5 \text{ mm}$ 的光阑;由于谐振腔内具有很高的增益,输出镜应选择较高的透射率,经实验优化为透射率 $T=90\%$;优化抽运电源的占空比,在占空比为 17%,重复频率 100 Hz,脉宽 1.7 ms 时谐振腔输出功率最高。

对振荡级的四棒串接谐振腔,采取调整抽运功率的方法来匹配各个晶体棒的热焦距,依次微调每根晶体棒的抽运功率并观察激光器的输出功率,在输出功率达到最高且功率曲线线性增加时,晶体棒热焦距基本达到匹配。调整抽运功率前后的输出功率曲线如图 4 所示,从图中可以看出,未调整抽运功率时,由于晶体棒的热焦距未完全匹配,在抽运功率为 49 kW 时激光器不能快速通过临界点而工作在非稳区,输出功率受到影响。通过调整抽运功率使各个晶体棒的热焦距达到匹配后,激光器快速通过临界点,降低了非稳区对输出功率的影响。在输入电功率 58 kW,重复频率 100 Hz,脉宽 1.7 ms 时,最高输出功率为 2032 W,总的电光转换效率 3.5%。

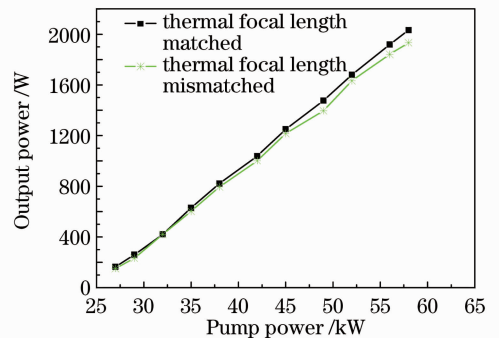


图 4 振荡级四棒串接谐振腔的输出功率曲线
Fig. 4 Experimentally measured output average power of four-rod oscillator

测量振荡级谐振腔输出激光的方向,根据激光的输出方向将放大级的激光模块依次调整好。由于输出镜采用厚度为 3 mm 的石英玻璃,在 1064 nm 波长下折射率为 1.45,因而放大级晶体棒间距分别设置为 $d_6=208.5 \text{ mm}$, $d_7=420 \text{ mm}$,以实现光束模式与放大级晶体棒匹配。放大级晶体棒棒 5 和棒 6 的激光入射端分别放置 $\phi 7.5 \text{ mm}$ 光阑对晶体棒进行保护。测量经过两级放大模块的输出功率如图 5 所示。经过两级模块放大后,在输入电功率 87 kW,

占空比 17% 时,最高输出功率为 3011 W,总的电光转换效率 3.46%。测量不同频率下的单脉冲能量如图 6 所示,在重复频率 45 Hz 时,最高单脉冲能量为 67 J。

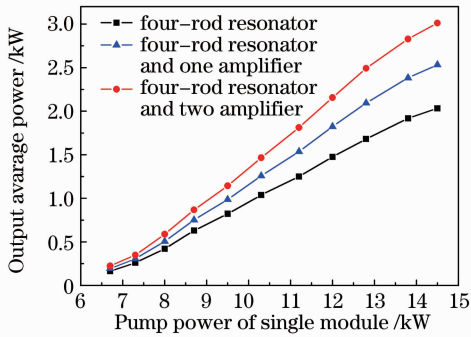


图 5 MOPA 脉冲 Nd:YAG 激光器的输出功率曲线

Fig. 5 Experimentally measured output average power of MOPA pulsed Nd:YAG laser

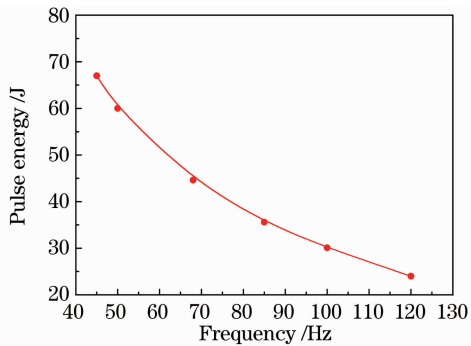


图 6 不同频率下的脉冲能量

Fig. 6 Experimentally measured pulse energy versus frequency

将输出激光经分光镜衰减后采用感光像纸成像法测量光束质量,距离晶体棒 6 的出光端面 20 cm 和 120 cm 处的光斑形状如图 7 所示,光斑直径分别为 6.5 mm 和 22.0 mm,计算光束参数乘积为 25.2 mm·mrad。由于激光器的光束质量和输出功率范围无法同时满足^[17],为了实现高平均功率输出,激光器降低了光束质量的要求。采用增加腔长、

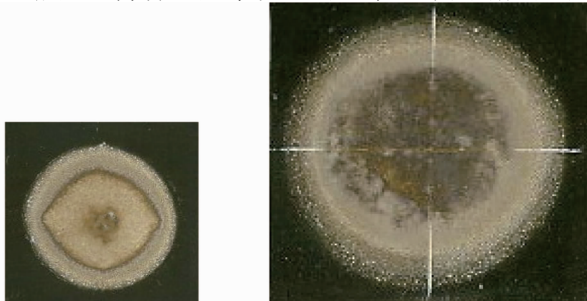


图 7 不同位置的光束光斑

Fig. 7 Beam spot at different positions

限制振荡光模式或者缩小棒径的方法可以提高光束质量,但这也引起输出功率的降低。测试激光器输出功率稳定性,激光器运行 4 h,输出功率不稳定性小于 2%。

为了与 MOPA 结构进行对比,对六棒串接振荡进行了实验研究。谐振腔采用对称平平腔结构,棒镜间距 $d=210$ mm;谐振腔两端分别放置两个直径为 $\phi 7.5$ mm 的光阑;输出镜透射率经实验优化为 $T=95\%$ 。在输入电功率 87 kW 时,六棒串接振荡最高输出功率为 3043 W,电光转换效率 3.5%,光束质量为 26.3 mm·mrad。

从实验结果可以看出,MOPA 结构输出功率比六棒串接振荡稍有降低。这主要是由于 MOPA 结构不是完全饱和增益放大,因而激光器的整体效率稍有降低。考虑到 MOPA 结构降低了调整的难度,提高了脉冲激光器的安全性能,效率稍有降低是可以接受的结果。

5 结 论

对于多个晶体棒串接的脉冲激光器,MOPA 结构虽然效率稍有降低,但是考虑到其不仅可以提高激光器的安全性能,而且谐振腔内晶体棒数量减少,更加容易实现热焦距匹配,因而仍然是实现高平均功率、高脉冲能量输出的有效方式。实验中,激光器采用四棒振荡两棒放大的 MOPA 结构,在输入电功率 87 kW,占空比 17% 时,最高输出功率为 3011 W,峰值功率 17.7 kW,最高单脉冲能量为 67 J,光束参数乘积为 25.2 mm·mrad。电光转换效率 3.46%,长时间输出功率不稳定性小于 2%。

参 考 文 献

- 1 G. Overton, S. G. Anderson, D. A. Delforte *et al.*. Laser marketplace 2010: how wide is the chasm[J]. *Laser Focus World*, 2010, **46**(1): 32~49
- 2 Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun *et al.*. Application and research of laser processing automobile body manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 17~23
陈根余,梅丽芳,张明军等.激光焊接、切割在汽车制造中的应用[J].*激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 17~23
- 3 Lu Feixing. Market analysis of laser process in industries manufacture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 24~28
卢飞星.激光加工在工业制造业中的市场分析[J].*激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 24~28
- 4 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798
杨洗陈.激光加工机器人技术及工业应用[J].*中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 5 K. P. Driedger, R. M. Ifflander, H. Weber. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam

- quality[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(4): 665~673
- 6 Liu Xuesheng, Xia Jiaozhen, Yan Xing *et al.*. High peak power lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser with one cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1313~1317
刘学胜, 夏皎贞, 颜歆等. 单级静态高功率灯抽运脉冲 Nd:YAG 固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1313~1317
- 7 H. P. Kortz, R. Iffländer, H. Weber. Stability and beam divergence of multi mode lasers with internal variable lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(23): 4124~4134
- 8 R. J. St. Pierre, G. W. Holleman, M. Valley *et al.*. Active tracker laser (ATLAS) [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1): 64~70
- 9 M. Kumkar, B. Wedel, K. Richter. Beam quality and efficiency of high average power multirod lasers [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1992, **24**(2): 67~72
- 10 Xiaodong Yang, Qinjun Peng, Yong Bo *et al.*. Highly efficient diode-pumped seven-rod resonator with a 3.79-kW output [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 703~705
- 11 Fang Mingxing, Li Qiang, Jiang Menghua *et al.*. Four rod resonator for krypton lamp pumped CW Nd:YAG laser with high power output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1644~1648
房明星, 李强, 姜梦华等. 四棒串接连续灯泵浦 Nd:YAG 大功率激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1644~1648
- 12 Wang Yunqian, Bi Guojiang, Du Tao *et al.*. Nd:YAG laser with high peak power and large energy[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(3): 188~191
王运谦, 秘国江, 杜涛等. 高峰值功率大能量 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(3): 188~191
- 13 Yang Xiaodong, Sun Zhipei, Bi Yong *et al.*. A simple and efficient diode-pumped Nd:YAG master-oscillator power-amplifier laser system with 2.35J/100 Hz output [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1373~1376
杨晓东, 孙志培, 毕勇等. 高效率激光而激光泵浦 100 Hz, 3.5 J Nd:YAG MOPA 激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1373~1376
- 14 M. Vittorio. Resonator for solid-state laser with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~117
- 15 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 339~346
吕百达. *激光光学* [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 339~346
- 16 Li Qiang, Wang Zhimin, Zuo Tiechuan. A method measuring thermal lens focal length of all rays polarized in radial and tangential direction of high power Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **24**(1-3): 155~158
- 17 Qiang Li, Zhimin Wang, Zhiyong Wang *et al.*. 600-W lamp pumped CW Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 535~537

栏目编辑:宋梅梅