

# 谐振放大结构的大功率 Nd:YAG 激光器设计及分析

张 健<sup>1</sup> 郭 亮<sup>1,2</sup> 张庆茂<sup>1</sup> 李方志<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)  
(<sup>2</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

**摘要** 采用一级谐振两级放大的系统结构和激光单元分块设计方法, 研制出了工业大功率脉冲固体激光器。在输出平均功率为 957 W 连续运转 2 h 后的功率不稳定性为 2.5%, 光电转换效率为 3%, 光束质量达到 22 mm·mrad, 激光耦合进入  $\phi 0.6$  mm 的光纤, 放大级之后最高输出功率达到 1125 W。

**关键词** 激光器; Nd:YAG 激光器; 谐振放大; 激光单元; 大功率

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0402002

## Resonant Amplification Structure of High-Power Nd:YAG Laser Design and Analysis

Zhang Jian<sup>1</sup> Guo Liang<sup>1,2</sup> Zhang Qingmao<sup>1</sup> Li Fangzhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510006, China  
<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

**Abstract** Using a resonant two-stage amplified system structure and the laser unit block design methods, high-power pulsed solid-state lasers for industrial are developed. The average output power of 957 W runs continuously for 2 h. The technical parameters such as power instability of 2.5%, photoelectric conversion efficiency of 3%, beam quality of 22 mm·mrad are achieved, and the laser is coupled into the  $\phi 0.6$  mm fiber. In the amplification stage behind the highest output power is up to 1125 W.

**Key words** lasers; Nd:YAG laser; resonant amplifier; laser unit; high-power

**OCIS codes** 140.3460; 140.3530; 140.3538; 140.3580

## 1 引 言

高功率固体激光器具有输出波长短、有利于材料吸收、便于光纤传输的特点, 而光纤传输具有柔性好、安全性高、坚固耐用等优点, 因而光纤传输高功率固体激光器在工业材料加工中得到广泛应用<sup>[1~4]</sup>。采用多棒串接或谐振放大的主振荡功率放大器(MOPA)系统结构是实现高功率固体激光器

最为有效的方法。在多棒串接中, 各晶体棒的特性和抽运功率不可能完全相同, 造成晶体棒间的热焦距不匹配, 使得谐振腔工作时工作点经过的非稳区变长, 稳区变短, 不利于高功率激光的稳定输出<sup>[5~7]</sup>。而采用 MOPA 系统结构, 它有利于减少临界点的出现, 提高了激光输出的稳定性, 同时还可以通过增大放大级棒材直径的方法来避免棒材的损

**收稿日期**: 2011-11-07; **收到修改稿日期**: 2011-12-15

**基金项目**: 粤港关键技术招标东莞专项(20092052060010)、广东省教育部科技部企业特派员行动计划(2009B090600001)、广东省教育部产学研结合重点项目(2010A090200048)、华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心开放基金项目(2011006)资助课题。

**作者简介**: 张 健(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光先进技术方面的研究。E-mail: zhangjian200623@sina.com

**导师简介**: 张庆茂(1966—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: zhangqm@senu.edu.cn

伤<sup>[8,9]</sup>。

本文在理论分析的基础上给出了具体的激光单元及参数的设计步骤和方法,设计实现了一级谐振两级放大的大功率 Nd:YAG 固体激光器,通过实验测量得出了激光器的具体参数。

## 2 激光器整体设计

为了既满足光束柔性传输又满足高功率输出的要求,设计中采用一级谐振两级放大的 MOPA 系统结构<sup>[10]</sup>,利用谐振级输出的激光依次通过一、二放大级,使激光逐级放大而得到大功率激光输出。并分别对谐振级、放大级、聚光腔、抽运源及水冷等激光单元进行理论分析及实验,最终确定了激光器的总体结构及各单元模块参数。

### 2.1 谐振腔设计

根据激光设备的总体机械尺寸要求,设计出一级谐振两级放大的脉冲 Nd:YAG 激光器。结构如图 1 所示。

#### 2.1.1 腔型的选取

对平凹腔和对称平平腔进行了实验,实验结果如图 2 所示。由图 2(a)可以看出在腔长为 690 mm 时,平凹腔的输出功率略高于平平腔的输出功率。在抽运电功率为 8 kW 时两腔型都受到热焦距影响

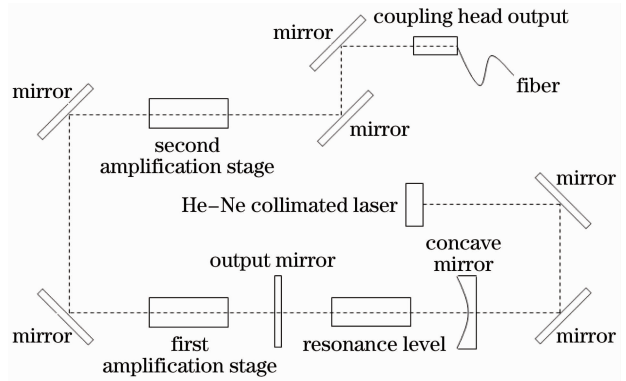
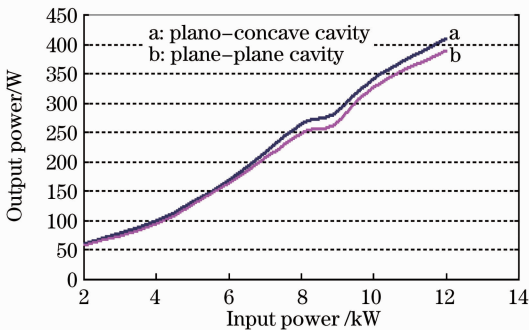


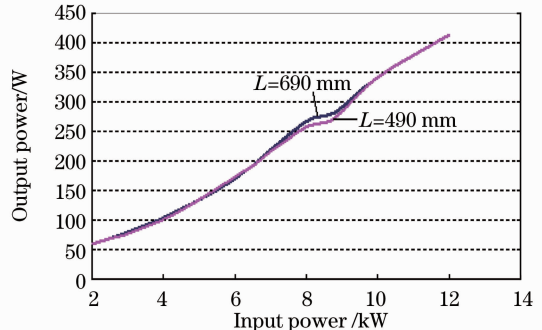
图 1 一级谐振两级放大的脉冲 Nd:YAG 激光器结构示意图

Fig. 1 A resonant and two stage amplification pulse Nd:YAG laser structure diagram

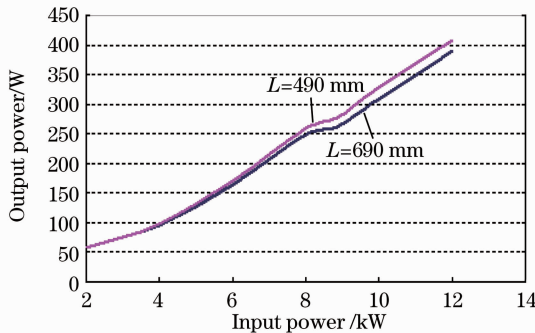
而出现输出功率增幅暂时下降的现象,但平凹腔下降的幅值略小于平平腔,这说明平凹腔的热稳定性高于平平腔。由图 2(b)、(c)还可以看出在腔长变化时,平凹腔的输出功率变化不大,而对称平平腔的输出功率变化较大。由以上分析知,腔长相同时平凹腔的输出功率和稳定性略高于对称平平腔。故设计中采用平凹腔。具体参数如下:全反镜  $\phi 2$  cm, 曲率半径  $R=4$  m; 输出镜  $\phi 2$  cm, 透射率  $T=60\%$ ; 腔长  $L=690$  mm。



(a) input and output power diagram of different cavities with cavity length  $L=690$  mm



(b) input and output power diagram of plano-concave cavity under different conditions of cavity length



(c) input and output power diagram of plano-plano cavity under different conditions of cavity length

图 2 输入输出功率曲线

Fig. 2 Curves of input and output power

### 2.1.2 工作物质的选取

根据光单程经过工作物质后光强的变化  $I = I_0 R \exp[(g - a)L]$  式和阈值增益系数  $g_{th} = a + 1/2L \ln(1/R)$  式(式中  $I_0$  为初始光强,  $R$  为输出镜反射率,  $g$  为单程增益系数,  $L$  为晶体长度,  $a$  为工作物质的损耗系数)可知<sup>[11]</sup>, 晶体棒越长光强单程增益越大, 阈值增益系数越小, 有利于高功率的输出; 同时考虑到便于输出光斑耦合进放大级及防止因晶体棒过长引起的破坏, 故设计中采用  $\phi 8 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ , 掺杂原子数分数为 0.8% 的晶体棒。

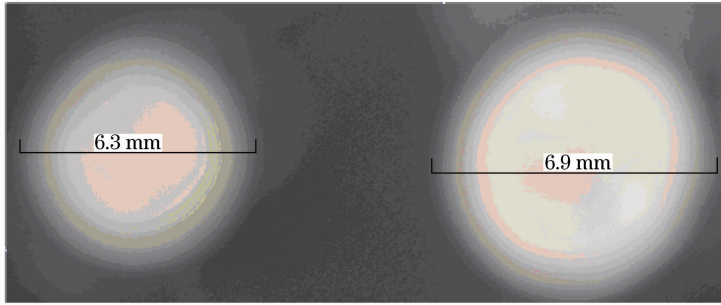


图 3 输出光斑大小(70 $\times$ )

Fig. 3 Output beam spot size (70 $\times$ )

## 2.3 其他辅助设计

### 2.3.1 抽运源及水冷的设计

为了得到高的抽运效率和较好的抽运均匀性, 设计中采用了和工作物质尺寸相匹配的氙灯, 即灯棒直径比为 1:1。谐振级为  $\phi 8 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  的氙灯, 一、二级为  $\phi 9 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  的氙灯。灯、棒分别水冷的冷却方式具有流速大、散热均匀、冷却能力强、热传导系数大、体积膨胀系数小、黏度小、化学性能稳定, 并且可防止对聚光腔反射表面污染的优点, 故设计中采用棒、灯分别水冷方式。

### 2.3.2 聚光腔的选取

在尺寸相同且离心率  $e=0.5$  时, 漫反射腔的传输效率比镜面反射腔的传输效率低 13% 左右<sup>[12]</sup>, 对获得高功率输出不利, 故采用镜面反射镀金腔。在灯棒直径比为 1 的条件下, 分别对单、双椭圆镀金腔的传输效率进行了计算分析, 得出单、双椭圆镀金腔的传输效率随离心率变化的关系图, 如图 4 所示。由图可知, 单椭圆镀金腔的传输效率明显高于双椭圆镀金腔, 在离心率  $e=0.5$  时, 双椭圆镀金腔的传输效率为 48% 且达到其总效率的 96%, 单椭圆镀金腔的传输效率为 61%, 两者比较相差不大, 双椭圆镀金腔相对自身也获得了高传输效率。同时由于单椭圆采用单灯抽运, 虽然传输效率高, 但抽运总功率低、激光输出功率低、抽运均匀性差; 而双椭圆采用

## 2.2 放大级的设计

利用感光相纸采集在 12 kW 电功率抽运下谐振级和一级放大级输出光斑直径的方法来决定一、二放大级工作物质的直径, 实验结果如图 3 所示。图中左侧光斑为谐振级输出光斑, 大小为  $\phi 6.3 \text{ mm}$ ; 右侧光斑为一级放大级输出光斑, 大小为  $\phi 6.9 \text{ mm}$ 。为了防止一、二放大级工作物质的损伤, 一、二放大级工作物质的直径应分别大于  $\phi 6.3 \text{ mm}$ 、 $\phi 6.9 \text{ mm}$ , 故一、二放大级都采用  $\phi 9 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ , 掺杂原子数分数为 0.8% 的晶体棒。

双灯抽运, 虽然传输效率稍低, 但抽运总功率高、激光输出功率高、抽运均匀性高。故设计中采用离心率  $e=0.5$  的双椭圆镀金腔。

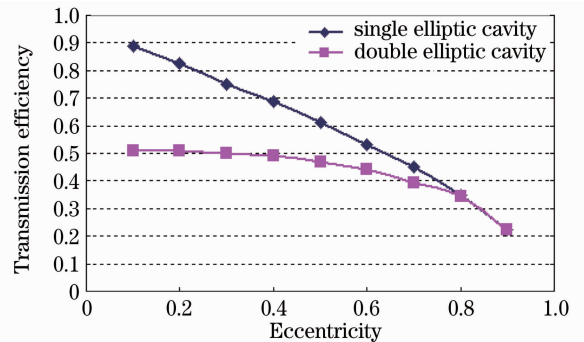


图 4 传输效率随离心率变化的关系图

Fig. 4 Diagram of transmission efficiency changing with eccentricity rate variation

## 3 实验装置及方法

实验装置采用设计实现的一级谐振两级放大激光器, 如图 5 所示。谐振级和放大级采用相同的激光电源, 相同脉冲功率控制和同时触发的方式。冷却水温为  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 对激光器放大级的输入输出特性进行分析; 在脉冲宽度为  $4 \text{ ms}$ 、重复频率为  $16 \text{ Hz}$ 、脉冲峰值为  $15 \text{ kW}$ 、激光器放大级的输出平均功率为  $957 \text{ W}$  连续运转 2 h 后, 进行稳定性实验, 测出不

同时刻的输出平均功率,绘制功率波动曲线进行分析;利用感光相纸采用刀口法<sup>[13]</sup>测出激光器放大级在脉冲宽度为 5 ms、重复频率为 15 Hz、脉冲峰值为 15 kW、放大级之后输出平均功率为 1125 W 时的光束束腰直径,利用感光相纸采集不同位置的光斑大

小,近似计算出远场发散角,最后计算出光束质量<sup>[14]</sup>;同时在该条件下,采用实验调节光纤耦合头与输出镜的距离及微调耦合头聚焦镜与光纤端面距离的方法,找到满足光束耦合条件时,光纤耦合头与输出镜的距离及耦合头聚焦镜与光纤端面的距离<sup>[15]</sup>。

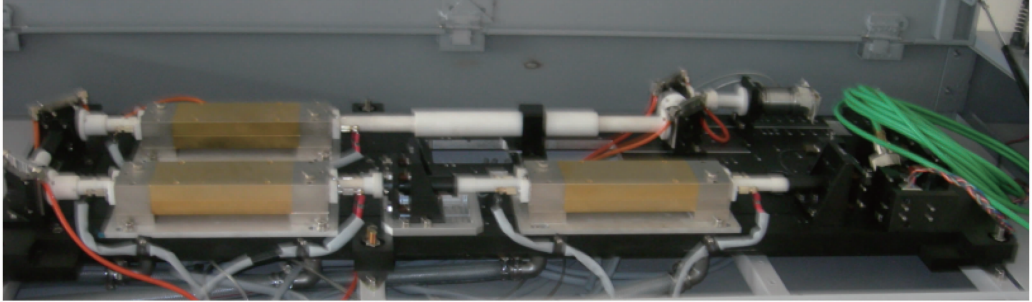


图 5 一级谐振两级放大激光器

Fig. 5 A resonant and two stage amplification laser

## 4 实验结果及分析

### 4.1 输入输出特性

图 6 为输入输出功率特性曲线图,从图中可以看到在抽运功率为 20 kW 时,曲线上升的斜率突然变小,而且在微小区域内还出现输出功率下降的现象。这是由于随着抽运功率的增加,晶体棒的热焦距随之变小,使得动态工作点经过非稳区而引起的。动态工作点经过非稳区后,输出功率又呈现出线性增加的趋势。从图中可以看出激光器放大级之后的最大输出功率为 1125 W,还可以计算出激光器的光电转换效率为 3%,所设计的大功率激光器可满足激光加工工业的需要。

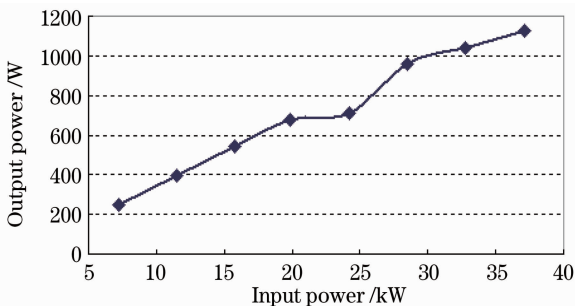


图 6 输入输出功率曲线图

Fig. 6 Curve of input and output power

### 4.2 稳定性分析

图 7 为激光器在平均功率 957 W 时连续运转 2 h 后输出功率随时间变化的曲线图,图中曲线在起始段平滑下降后,随着时间的增加整条曲线趋于平滑,表明输出功率波动较小,整体上趋于平稳输出。由图计算得知功率不稳定性为 2.5%,能够满足激

光加工工业的需要。

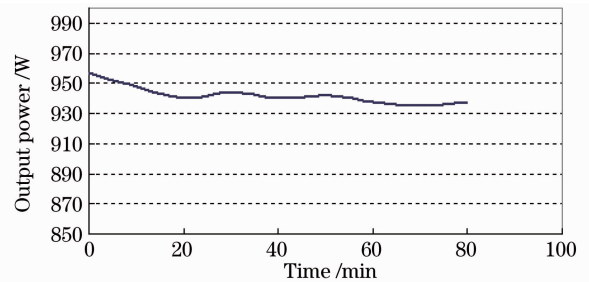


图 7 输出功率随时间变化曲线图

Fig. 7 Curve of output power versus time

### 4.3 光束质量及光纤耦合

采用刀口法测得激光透射率为 94% 和 6% 的对应位置即光束束腰直径  $\phi 7.2$  mm,利用感光相纸在相距输出镜距离为  $S_1 = 200$  mm、 $S_2 = 500$  mm 时,测得的光斑直径分别为  $\phi_1 7.4$  mm、 $\phi_2 8.3$  mm。代入  $\frac{\theta_\infty}{2} = \arctan \frac{\phi_2 - \phi_1}{2(S_2 - S_1)}$  得  $\theta = 3.06$  mrad。由此计算出光束质量为  $22$  mm·mrad,达到了光纤耦合所需的光束质量。在此条件下选用带有焦距为 50 mm 单个聚焦镜的耦合头进行  $\phi = 0.6$  mm 的硬包层石英(HCS)光纤耦合,实验测得在光纤耦合头与输出镜距离为  $S_3 = 230$  mm,耦合头聚焦镜与光纤端面距离  $S_4 = 50.1$  mm 时,光束成功耦合进入光纤,实现了光的柔性传输。同时得出大功率输出时,为防止光纤端面因超出其表面阈值造成的损伤,聚焦镜距离光纤端面的距离要大于其焦距 1 mm 左右较好。在实验中因距离调节不够理想,使得光束经过聚焦后光斑直径和发散角匹配不够协调,造成

两条光纤被损坏。

## 5 结 论

设计实现的一级谐振两级放大固体激光器, 获得高功率输出的同时又具有较低的功率不稳定性, 满足了工业材料的激光加工需求。同时基于光纤耦合技术使得大功率固体激光器具有柔性加工的特点。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang *et al.*. Experiment on delivery of megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1934~1937  
赵兴海, 胡建平, 高 杨 等. 大芯径光纤传输兆瓦级 Nd:YAG 激光脉冲实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1934~1937
- 2 Li Dongxue, Wang Ding, Chen Xiaowei *et al.*. Generation of high-energy few-cycle pulses compression through a hollow-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1939~1942  
李冬雪, 王 丁, 陈晓伟 等. 基于空心光纤技术产生高能量周期量级脉冲压缩[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1939~1942
- 3 Zhou Shouhuan. Solid state laser technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1994, **24**(4): 18~22  
周寿桓. 固体激光技术研究[J]. *激光与红外*, 1994, **24**(4): 18~22
- 4 J. M. Eggleston, R. L. Byer. Beam delivery for Nd:YAG laser [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(9): 2683~2687
- 5 Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong *et al.*. Study on producing non-tapered holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003004  
姜梦华, 李 强, 雷 旬 等. 高峰值功率自准直脉冲 Nd:YAG 激光加工无锥度直孔研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003004
- 6 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1616  
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, **36**(7): 1605~1616
- 7 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, **24**(4): 665~673
- 8 S. Lee, M. Yun, B. H. Cha *et al.*. Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser with 770-W output power[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5625~5631
- 9 Liu Wenyan. Nd:YAG Laser Amplifier Parameter Optimization [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009. 3~37  
刘文研. Nd:YAG 固体激光放大器的参数优化研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009. 3~37
- 10 Gregory D. Goodno, Hiroshi Komine, Stuart J. Mcnaught *et al.*. 19 kW phase locked MOPA laser array [C]. Nevada: Advanced Solid-State Photonics, 2006
- 11 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Principle of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 24~200  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 24~200
- 12 Li Qiang. Industrial High Power Solid Laser Technology Research [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. 12~113  
李 强. 工业大功率固体激光器技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. 12~113
- 13 Yang Xiaodong, Shao Jianxin, Liao Shenghong. Gauss knife edge method measuring the beam spot radius research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **39**(8): 830~832  
杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究 [J]. *激光与红外*, 2009, **39**(8): 830~832
- 14 Pu Jixiong. High power laser beam quality and focusing [J]. *Journal of Huaqiao University*, 1996, **17**(3): 236~239  
蒲继雄. 高功率激光光束的光束质量及聚焦[J]. *华侨大学学报*, 1996, **17**(3): 236~239
- 15 Jiang Junfeng, Li Haiwei, Liu Tiegeng *et al.*. Experimental research on micro-tube biosensor based on hollow optical fiber [J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(6): 1421~1425  
江峻峰, 李海伟, 刘铁根 等. 基于空心光纤构建微管生物传感器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1421~1425

栏目编辑: 宋梅梅