

高重复率钕玻璃冲击处理装置的多横模激光振荡器

杨兴华¹ 管海兵^{1*} 吴鸿兴² 郭大浩² 张永康¹ 任旭东¹ 鲁金忠¹

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 中国科技大学强激光技术研究所, 安徽 合肥 230026)

摘要 讨论了用于冲击处理装置的多横模激光振荡器,给出了高重复率钕玻璃激光冲击处理装置的设计,并详细说明了光路安排中各个光学器件的设计参数。实验测量了激光器单次和以重复频率 0.5 Hz 运转时输出的能量,并且测量了激光器在正常运转时激光脉宽和放大自发辐射(ASE)的大小。测量结果表明,在单次和 0.5 Hz 频率运转时,激光输出能量都能达到 40 J 以上;激光的脉宽稳定在 22 ns 左右;激光输出的 ASE 大约为 16 mJ。测量数据表明,该激光器可以用来进行激光冲击强化的实验研究装置。

关键词 激光器;多横模;钕玻璃棒;高重复率;激光冲击处理

中图分类号 TN248

OCIS 140.3580 140.3280

文献标识码 A

Multiple Transverse Mode Laser Oscillator of High Repetition-Rate Nd:Glass Shock Treatment Installation

Yang Xinghua¹ Guan haibing¹ Wu Hongxing² Guo Dahao² Zhang Yongkang¹
Ren Xudong¹ Lu Jinzhong¹

¹ Mechanical Engineering School, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

² Institute of High Power Laser Technology, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Multiple transverse mode laser oscillator of high repetition-rate Nd:glass shock treatment installation is discussed. The design of high repetition-rate Nd:glass laser shock processing and the parameters of various optical elements are given. The laser output energy, pulse width and amplified spontaneous emission (ASE) are measured at the single frequency and 0.5 Hz frequency. The results show that the laser output energy can reach more than 40 J, with laser width of 22 ns and ASE of about 16 mJ, and the laser can be used for laser shock processing.

Key words lasers; multiple transverse mode; Nd:glass rod; high repetition-rate; laser shock processing

1 引言

通常,激光装置中的激光振荡器的各项指标(如模式、光束发散角、单色性、脉宽、调制性能等)都较好,但输出能量较低(只有毫焦耳量级),因为输出能量与各项指标是矛盾的^[1]。既要获得好指标,又要高能量,必须加足够多的放大器。但这样一来,整个激光装置的体积必然庞大^[2]。为了使整个激光装置体积减小一些,可增加激光振荡器的输出能量,就可减少激光放大器的级数,因此本文提出了多横模激光振荡器的想法。因为冲击处理激光装置对各项指标要求不是太高,特别是不要基横模,没必要加小孔选横模,这样激光振荡级的能量就可以大些。

2 高重复率钕玻璃高功率激光处理装置

图 1 为把多横模激光振荡器作为激光振荡级的高重复率钕玻璃高功率激光处理装置的总体光路图^[3~7]。

收稿日期: 2009-05-12; 收到修改稿日期: 2009-08-14

基金项目: 国家 863 计划(2002AA336030)和国家自然科学基金(50275068)资助课题。

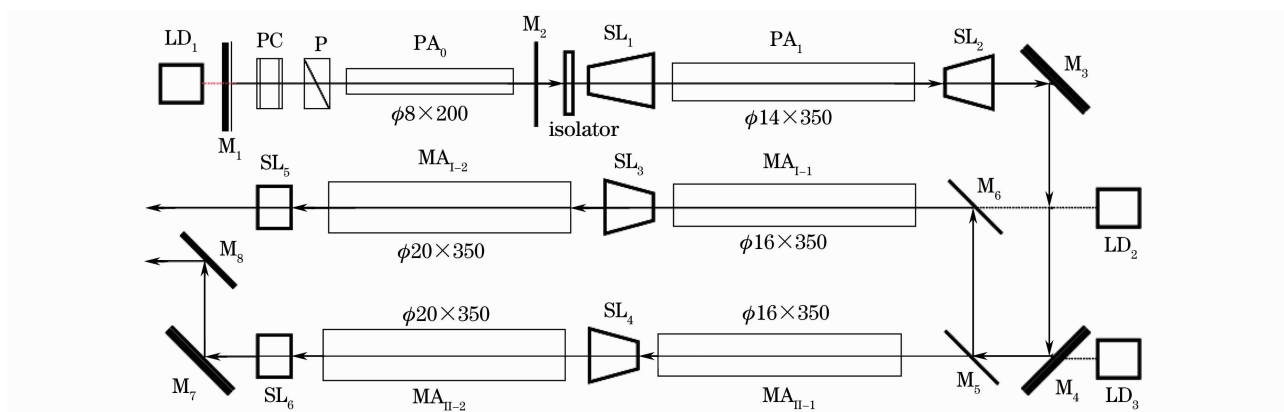
作者简介: 杨兴华(1975—),男,博士研究生,主要从事激光加工和激光器件方面的研究。E-mail: xhyang@ujs.edu.cn

导师简介: 张永康(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工和激光器件等方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ghb_2007@163.com

激光振荡器用 $\phi 8 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的磷酸盐 N_{21} 型介质, 谐振腔为平-平腔, 输出镜为 K_9 平板玻璃。由于不用小孔选横模, 激光棒较大较长, 谐振腔调整好之后, 输出是多横模, 能量达到 2 J。



LD₁~LD₃: semiconductor lasers, M₁: 0° total reflection mirror, M₂: output mirror, M₃, M₄, M₆~M₈: 45° total reflection mirror, M₅: 45° semi-permeable and semi-reflective mirror, P: polarizer, PC: KD*P crystal, SL₁~SL₆: expander, PA_m, MA_{m-n}: neodymium glass rod

图 1 高功率激光装置的总体光路排布

Fig. 1 Overall optical path arrangement of high-power laser device

各级激光棒参数分别为: 1) 调 Q 激光振荡器 (PA₀) 中激光介质为 $\phi 8 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 磷酸盐 N_{21} 钽玻璃棒, 用 $\phi 12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的脉冲氙灯双灯抽运, 聚光腔为陶瓷漫反射腔, 电光调 Q 开关 (KD*P) 的通光口径为 $\phi 15 \text{ mm}$, 内装匹配液; 2) 激光预放大器 (PA₁) 中激光介质为 $\phi 14 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的磷酸盐 N_{21} 钽玻璃棒, 用 $\phi 22 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 脉冲氙灯双灯抽运, 聚光腔为双椭圆金属铜镀银腔; 3) I 路第 1 级激光主放大器 (MA_{I-1}) 中激光介质为 $\phi 16 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 磷酸盐 N_{21} 钽玻璃棒, 用 $\phi 22 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 脉冲氙灯双灯抽运, 聚光腔为双椭圆金属铜镀银腔; 4) I 路第 2 级激光主放大器 (MA_{I-2}) 中激光介质为 $\phi 20 \text{ mm}$ (或 $\phi 18 \text{ mm}$) $\times 350 \text{ mm}$ 的磷酸盐 N_{21} 钽玻璃棒, 用 $\phi 22 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 脉冲氙灯双灯抽运聚光腔为双椭圆金属铜镀银腔; 5) II 路第 1 级激光主放大器 (MA_{II-1}) 与 II 路第 2 级激光主放大器 (MA_{II-2}) 的各种参数一致。

各级电源充电电压设定值为: 调 Q 激光振荡器电源充电电压为 1680 V, 预放大器电源充电电压为 1900 V, 激光主放大器电源 (4 节电源相同) 充电电压为 2000 V。激光能源 (由电容器提供) 部分分别为: 激光振荡器能源的电容量/灯为 200 μF , 激光预放大器能源的电容量/灯为 300 μF , 激光主放大器能源的电容量/灯为 600 μF 。循环水冷系统开动时, 温度为 25 °C, 温差为 2 °C, 并在振荡级外加了被动隔离器 $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$ (透射率约 70%)。

3 激光装置总体输出参数测试

3.1 激光脉冲能量

激光脉冲能量测试所用仪器为 PT-1C 型体吸收激光能量计 (200 J 档, 测量精度 0.1 J), 测试光路排布如图 2 所示。当激光束与取样光学平板的入射角 $\theta \leq 15^\circ$ 时, 取样光学平板每个面对激光束的反射率为 4%。

1) 单次运转输出激光脉冲能量: 调 Q 振荡器与各级放大器抽运能量密度 W_p 如表 1 所示。 W_p 设计值为现有激光电源与激光能源系统可以达到的抽运能量密度值。此时单次运转激光器输出激光脉冲能量如表 2 所示。

因此, 根据上述提供的各放大器充电电容和充电电压, 可以算出该激光器的总能量转换效率为 1.84%。两路激光分别通过等焦距的聚焦透镜, 在焦点处进行重合, 重合度达到 90% 以上, 总能量达到 45 J 左右。由于两路放大器的晶体结构、聚光腔、抽运能量、冷却条件和入射光能量都是等同的, 所以每一路出射光的能量是总能量的一半。实验测量结果与上述分析一致。

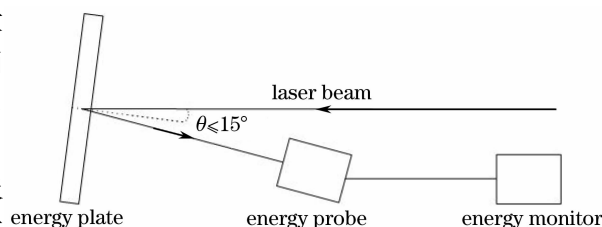


图 2 能量测试光路

Fig. 2 Optical path of energy measurement

表 1 单次运转放大器光抽运密度 W_p Table 1 Optical amplifier pump density W_p during single operation

	PA_0	PA_1	MA_{I-1}	MA_{II-1}	MA_{I-2}	MA_{II-2}
Design value $/(J/cm^2)$	80.0	45.0	67.0	67.0	42.0	42.0
Operation value $/(J/cm^2)$	37.5	18.7	21.9	21.9	18.0	18.0

表 2 单次运转激光器总体输出能量

Table 2 Total output energy during single operation

Test sequence	1	2	3	4	5
Laser pulse energy /J	43.5	46.8	42.1	46.9	45.9

2) 高重复率运转输出激光脉冲能量:激光器以重复频率为 0.5 Hz 运转,各级抽运能量密度 W_p 如表 3 所示。此时激光器输出激光脉冲能量如表 4 所示。

表 3 高重复率运转各级光抽运密度 W_p Table 3 Optical pump density W_p during high repetition-rate operation

	PA_0	PA_1	MA_{I-1}	MA_{II-1}	MA_{I-2}	MA_{II-2}
Design value $/(J/cm^2)$	80.0	45.0	67.0	67.0	42.0	42.0
Operation value $/(J/cm^2)$	37.5	23.7	21.9	21.9	15.8	15.8

表 4 重复率运转总体输出能量

Table 4 Total output energy during repetition rate operation

Test sequence	1	2	3	4	5
Laser pulse energy /J	42.9	41.5	42.7	41.4	44.0

因此可以算出平均输出激光脉冲能量 $\bar{E}=42.23$ J。从表 2 和表 4 的结果可以得出,以 0.5 Hz 重复频率运转时,激光器输出能量下降了 6.2%;由于激光器 0.5 Hz 运转时,介质的热透镜效应比较严重,阻碍了激光器正常的运转。实验证明,以上述抽运能量进行运转时,激光器只能正常工作 1 min 左右。

3.2 激光脉冲宽度

激光脉冲宽度用型号为 Tektronix TDS3012B 存储示波器以及 PIN 光电接收器(响应时间不大于 1 ns)进行测试,测试光路图如图 3 所示(其中 θ 为激光束的入射角, $\theta \leq 15^\circ$),激光脉冲波形测试结果如图 4 所示,激光脉冲半峰全宽(FWHM)约为 22 ns。

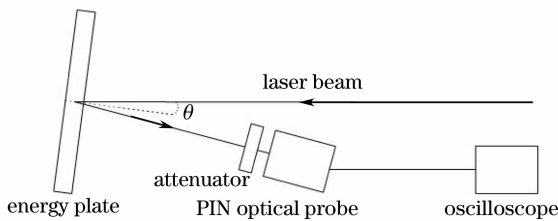


图 3 波形测试光路

Fig. 3 Optical path of pulse measurement

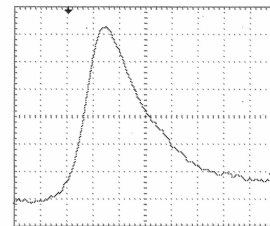


图 4 激光脉冲

Fig. 4 Laser pulse

3.3 放大自发辐射能量

放大自发辐射的测量是用 PT-1C 型体吸收激光能量计(2 J 档,测量精度为 0.1 mJ)进行测试的,测试光路同图 2 所示。当激光束与取样光学平板的入射角 $\theta \leq 15^\circ$ 时,取样光学平板每个面对激光束的反射率为 4%。此时,调 Q 振荡器与各级放大器抽运能量密度 W_p 值如表 5 所示。由测试结果可得,放大自发辐射能量 $E_{ASE}=0.016$ J。

表 5 各级抽运密度值 W_p Table 5 Optical pump density W_p of all levels

	PA_0	PA_1	MA_{I-1}	MA_{II-1}	MA_{I-2}	MA_{II-2}
Design value $/(J/cm^2)$	80.0	45.0	67.0	67.0	42.0	42.0
Operation value $/(J/cm^2)$	37.5	18.7	21.9	21.9	18.0	18.0

3.4 输出激光脉冲能量稳定度

由输出激光脉冲能量测试结果计算其统计平均误差,可得

$$\delta = \sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 / (n\bar{E}^2)} \leq 4.2\%$$

式中 E_i 为每次测量所得能量, n 为测量次数, 在本文中 $n=5, i=1, 2, \dots, 5$ 。相应的输出激光光斑如图 5 所示, 左图大光斑为装置的总体输出光斑, 右图小光斑为多横模振荡级调 Q 输出光斑。

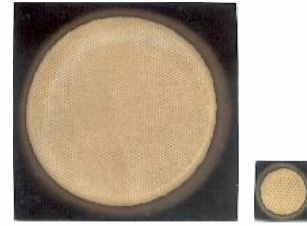


图 5 激光光斑形状
Fig. 5 Laser spot shape

在激光冲击强化中, 当激光波长为 $1.054 \mu\text{m}$, 输出脉冲宽度为 22.1 ns , 激光能量达到 36 J 时, 对曲轴激光冲击后轴颈表面残余压应力平均值达到 380 MPa 左右, 最大达 495 MPa ; 曲轴材料的表层硬度得到了明显的提高, 表面硬化层的显微硬度可高达 590 HV , 硬化层深度 1.0 mm 以上, 达到国外同类产品的性能水平。激光冲击强化既可保持曲轴整体的韧性, 又可显著提高曲轴轴颈表面的硬度和耐磨性, 并获得良好的表面压应力状态, 有利于提高曲轴的抗疲劳性, 是目前改善发动机曲轴抗磨性和抗疲劳性能的最好方法。

4 结 论

给出了多横模谐振腔的结构图, 并详细设计了高重复频率高能钕玻璃激光器。通过实验测试得出了激光器在单次和 0.5 Hz 频率运转时, 激光输出能量能够达到 40 J 以上, 同时 ASE 只有 16 mJ , 激光输出脉宽为 22 ns 。目前该设备已经成功应用于激光冲击强化实验。

参 考 文 献

- Lan Xinju. Laser Technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House, 1995. 131~132
蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 131~132
- Wu Hongxin, Guo Dahao, Zhou Yusheng *et al.*. High power Nd:glass laser and target chamber system and the experimental study of laser plasma X-ray[J]. *J. China University of Science and Technology*, 1985, **15**(1): 30~36
吴鸿兴, 郭大浩, 周榆生 等. 高功率钕玻璃激光装置和靶场系统及其 LPX 实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 1985, **15**(1): 30~36
- Ren Jingxiao, Ye Ai, Zhang Hongbo *et al.*. Nd:Ce:YAG laser with high peak power and large energy[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2007, **5**(2): 25~27
任竞骁, 叶艾, 张红波 等. 高峰值功率大能量Nd:Ce:YAG激光器的研究[J]. 光学与光电技术, 2007, **5**(2): 25~27
- Cao Sansong, Wang Mingqiu, Han Kai. High peak power repetition rate pulsed solid state lasers[J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(5): 266~271
曹三松, 王明秋, 韩凯. 高峰值功率重频脉冲固体激光器[J]. 激光技术, 1997, **21**(5): 266~271
- 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
- Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. New technology and new configuration for high energy laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 37~42
周朴, 许晓军, 刘泽金 等. 高能激光系统的新技术与新结构[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(1): 37~42
- Liu Xuesheng, Wang Zhiyong, Yan Xin *et al.*. 56 J high energy lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 237~239
刘学胜, 王智勇, 颜歆 等. 56 J 灯抽运高能脉冲Nd:YAG固体激光器[J]. 激光技术, 2008, **32**(3): 237~239