

# 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器

麻云凤<sup>1</sup> 余 锦<sup>1</sup> 牛 岗<sup>2</sup> 赵天卓<sup>1</sup> 闫 莹<sup>1</sup> 张 雪<sup>1</sup> 樊仲维<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094  
<sup>2</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100190)

**摘要** 报道了通过三级功率放大系统(LD 抽运双程放大系统、LD 双端抽运放大系统和 LD 单端抽运放大系统), 获得平均功率 50 W 以上的 1064 nm 皮秒激光输出。当皮秒振荡器种子注入功率为 6.67 W 时, 经过功率放大系统, 最高功率达到 53.7 W, 光-光转换效率为 30.07%, 皮秒脉冲宽度为 10.45 ps。采用非线性晶体 LBO 作为倍频(SHG)晶体, 实现平均功率最高达 27.16 W, 重复频率 80 MHz, 脉冲宽度小于 10 ps 的 532 nm 绿光输出, SHG 效率达 50.58%。整体设计在实现高的 SHG 效率的前提下, 保证不损伤 SHG 晶体, 使系统连续稳定工作 8 h 以上。

**关键词** 激光器; 功率放大器; 皮秒脉冲; 倍频

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1202010

## 25 W High Repetition Rate Picosecond Green Laser

Ma Yunfeng<sup>1</sup> Yu Jin<sup>1</sup> Niu Gang<sup>2</sup> Zhao Tianzhuo<sup>1</sup> Yan Ying<sup>1</sup>

Zhang Xue<sup>1</sup> Fan Zhongwei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)  
<sup>2</sup>Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China)

**Abstract** Average output power more than 50 W, 1064 nm picosecond laser with three power amplifier systems (LD double-pass amplifier, LD double end-pumped amplifier and LD single end-pumped amplifier) is reported. When input 6.67 W picosecond seed pulse, power amplifier's average power achieves to 53.7 W with optical-optical conversion efficiency of 30.07%, a pulse duration of 10.45 ps. By using of nonlinear crystal LBO for second harmonic generation (SHG) with high average power of 27.16 W, a repetition rate of 80 MHz, a pulse duration less than 10 ps, SHG efficiency higher than 50.58% are obtained. At premise of high SHG efficiency, the system guarantees against damaging SHG crystal, keeps uninterrupted running with stable power more than 8 h.

**Key words** lasers; power amplifier; picosecond pulse; second harmonic generation

**OCIS codes** 190.2620; 320.7090; 140.3480; 140.3280

## 1 引 言

高功率、高光束质量的超短脉冲激光器得到了广泛的应用。包括高精细加工、激光显示、高效谐波变换、准连续紫外电路板加工、激光材料处理、激光熔接、清洗、打标等<sup>[1~4]</sup>。最为突出的是 Hong 等<sup>[5]</sup> 2009 年 9 月报道的重复频率 78 MHz, 平均功率 130 W, 脉宽 8 ps 的波长 514.5 nm 兆赫兹皮秒绿光激光器。2009 年 Peng 等<sup>[6]</sup> 报道了 17.7 W 的皮秒

532 nm 绿光激光器, 及其他相关技术报道<sup>[7,8]</sup>。本文通过三级功率放大系统, 获得平均功率 50 W 以上的 1064 nm 皮秒激光输出。研制的皮秒绿光激光器作为北京大学超导射频粒子加速器的抽运源。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 振荡级经过隔离组件输出, 经 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 镜反射输出给第一级功放系统; 光

**收稿日期:** 2011-08-10; **收到修改稿日期:** 2011-09-15

**基金项目:** 国家 863 计划(2011AA030205)、中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)和国际科技合作项目(2010DFR50650)资助课题。

**作者简介:** 麻云凤(1981—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事全固态皮秒激光器及大型复杂全固态激光器等方面的研究。  
E-mail: yunfeng39@163.com

束经模式匹配透镜  $F_1$  聚焦进入第一级功放增益介质  $\text{Nd:YVO}_4$ , 再经  $\text{Nd:YVO}_4$  后反射面反射二次经过增益介质由直角棱镜和反射镜、 $M_3$  镜反射输入给第二级功放系统; 光束经模式匹配透镜  $F_2$  聚焦, 经  $M_4$  和  $M_9$  镜反射输出进入第二级功放增益介质  $\text{Nd:YVO}_4$ , 再经  $M_{10}$  和  $M_5$  镜反射输出进入第三级功放系统; 光束经模式匹配透镜  $F_3$  聚焦, 经  $M_6$  和  $M_{11}$  镜反射输出进入第三级功放增益介质  $\text{Nd:YVO}_4$ , 再经  $M_7$  镜反射输出。其中,  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$  和  $M_8$  均为  $45^\circ$  反射镜, 且增镀  $1064 \text{ nm}$  高反膜。  $M_9, M_{10}$  和  $M_{11}$  均为  $45^\circ$  反射镜, 且一面增镀  $1064 \text{ nm}$  高反膜, 两面均镀  $808 \text{ nm}$  增透膜。功放增益介质  $\text{Nd:YVO}_4$ , 第一级  $1064 \text{ nm}$  入射面增镀  $1064$  和  $808 \text{ nm}$  双增透膜,  $808 \text{ nm}$  入射面增镀  $1064 \text{ nm}$  高反膜和  $808 \text{ nm}$  增透膜; 第二级和第三级双面均镀  $1064$  和  $808 \text{ nm}$  双增透膜。晶体采用  $a$  向切割, 尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 掺杂原子数分数为  $0.3\%$ , 用铝箔包裹晶体放在热沉紫铜

块里。抽运单元 LD, 包括抽运模块及耦合聚焦镜组。每级模块均采用  $37 \text{ W}$  半导体激光器, 芯径  $800 \mu\text{m}$ 。第一级聚焦镜组扩束比  $1:1$ , 第二级聚焦镜组扩束比  $1:2$ , 第三级聚焦镜组扩束比  $1:3$ 。隔离组件包括两个偏振分光棱镜 (PBS), 一个磁光隔离器 (FR), 一个  $\lambda/2$  波片, 隔离组件均增镀  $1064 \text{ nm}$  增透膜。模式匹配透镜  $F_1$  焦距  $150 \text{ mm}$ ,  $F_2$  焦距  $150 \text{ mm}$ ,  $F_3$  焦距  $100 \text{ mm}$ , 且均增镀  $1064 \text{ nm}$  增透膜。由三级功放系统输出的  $1064 \text{ nm}$  基频光平均功率为  $50 \text{ W}$  以上, 采用一类临界相位匹配  $o+o=e$ , 倍频晶体采用 LBO 晶体,  $\theta=90^\circ, \phi=10^\circ$ , 晶体尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 输出  $532 \text{ nm}$  激光, 束腰半径  $r=0.08 \text{ mm}$ , 模式匹配透镜  $F_4$  的焦距为  $80 \text{ mm}$ , 加热炉温度  $59.4^\circ$ ,  $M_{12}$  为可使短波通过、 $532 \text{ nm}$  光透射输出、 $1064 \text{ nm}$  光反射的半透半反镜。LBO 晶体走离角  $5.97 \text{ mrad}$ , 非线性系数  $0.836 \text{ pm/V}$ , 温度调谐范围  $6.45 \text{ K} \cdot \text{mrad}$ , 最大接受角  $11 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$ , 晶体倾斜容差  $5.55 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$ 。

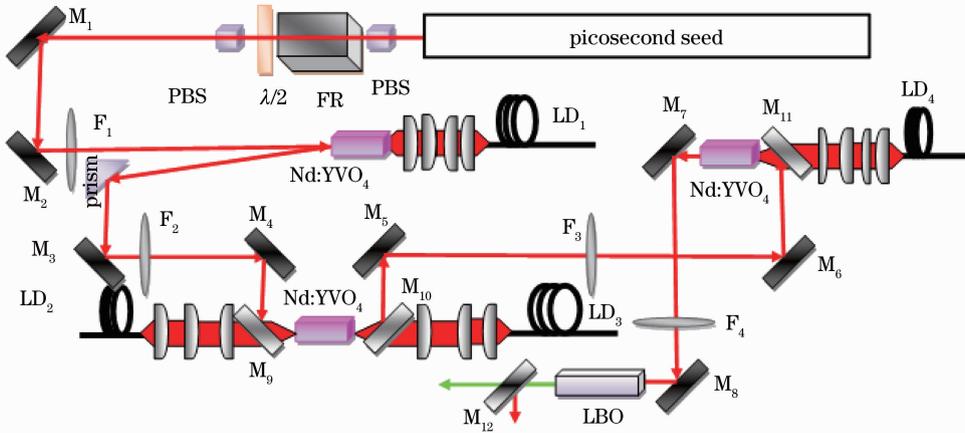


图 1 高功率皮秒绿光系统实验装置图

Fig. 1 Experiment schematic of the high power picosecond green laser system

### 3 实验结果与分析

测得振荡器种子光通过晶体静态损耗  $7\%$ , 种子光垂直偏振纯度  $97.54\%$ , 整个隔离组件共损耗  $9.06\%$ , 其中单个 PBS 晶体损耗  $2.91\%$ ,  $\lambda/2$  波片损耗  $0.95\%$ , FR 损耗  $3.61\%$ 。在连续抽运情况下, 晶体损伤阈值为  $22 \text{ kW/cm}^2$ , 安全功率密度应该控制在  $19 \text{ kW/cm}^2$  以下。

图 2 所示为三级功率放大器输入功率与输出功率及效率曲线。振荡器经过磁光隔离组件 FR 后功率为  $6.67 \text{ W}$ , 在第一级抽运源电流  $45 \text{ A}$ , 抽运功率  $39.7 \text{ W}$  时, 双程放大输出功率  $19.21 \text{ W}$ , 此时光束质量最好为  $\text{TEM}_{00}$  模, 最高转换效率  $31.59\%$ , 效率

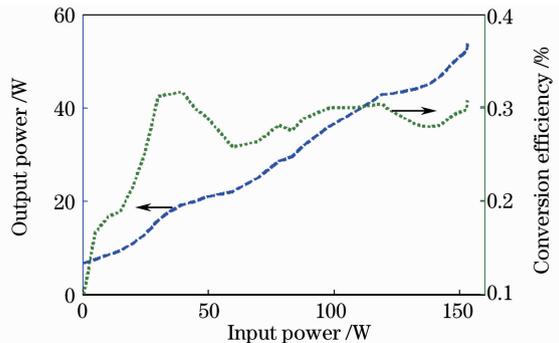


图 2 三级功率放大器输出功率和效率随输入功率的变化  
Fig. 2 Output power and efficiency of three power amplifiers versus input power

比后两级功放高,功率曲线值稳步增加,功率放大 2.88 倍。最大可以输出功率 24 W,但是光束质量劣化,双程引起热效应,所以耦合聚焦镜组采用离焦使用。

当第二级双端抽运源电流均为 45 A 时,二级功率放大获得 42.8 W,且光束为  $TEM_{00}$  模。当单开左侧抽运源,抽运源电流逐步增加,效率曲线值下降后回升,功率曲线值逐步增加,当电流为 43 A 时,功率增加到 28.6 W;再开右侧抽运源,抽运源电流逐步增加,效率曲线值稳步上升,功率曲线值逐步增加,当电流为 43 A 时,功率增加到 38 W。将两个抽运源串联,在电流为 45 A 时,两个抽运源功率和为 77.8 W,输出功率 42.8 W,最高效率 30.32%,功率放大 2.23 倍。

第三级抽运源电流逐步增加,效率较二级功率放大略有下降,效率曲线值下降后回升;功率曲线值逐步增加。当第三级单端抽运源电流为 45 A 时,三级功率放大获得 53.7 W,最大转换效率 30.07%,功率放大 1.25 倍。

利用相干功率计,长时间观测功率稳定性,5 h 稳定在 53 W。利用光谱仪测试光谱曲线,波长 1064.31 nm,带宽 0.34 nm,利用自相关仪测试放大器皮秒脉宽曲线,发现有很小的展宽。其测试曲线如图 3 所示。

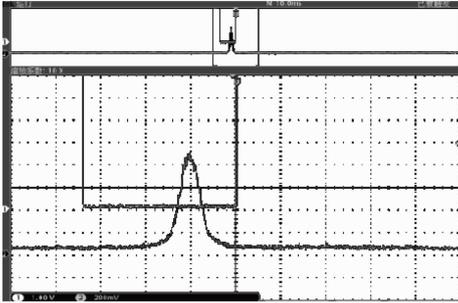


图 3 三级功率放大器自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation curve of three power amplifiers

皮秒激光脉宽为

$$T = 0.707 \times 2x \times t / (0.3s), \quad (1)$$

式中  $t$  为测量的正脉冲半峰全宽(取 4.61 ms),  $x$  为固定臂移动距离(取 4.5 mm),  $s$  为自相关曲线移动距离(取 10 ms)。则由(1)式可得皮秒振荡器脉冲宽度  $T \approx 9.78$  ps,三级功率放大器皮秒脉冲宽度  $T \approx 10.45$  ps。

脉冲展宽的原因在于增益变窄。对理想的高斯型激光脉冲而言,其带宽脉宽积为  $K = 0.442$ ,本激光功率放大器带宽脉宽积  $K = 0.9401$ ,略大于理想

值,近似带宽受限脉冲,说明脉冲的光谱中几乎没有冗余成分存在。同时观测自相关曲线,未发现纳秒底座,说明皮秒激光脉冲里没有纳秒激光脉冲。

通过一类临界相位匹配实现二次谐波的转换。只打开第一级功率放大器,由于热焦距的变化,基频发散角改变很大,导致基频在 LBO 晶体内的入射角变化,从而影响倍频(SHG)功率输出升高再下降。打开第一、二级功率放大器,体系热焦距开始稳定,基频发散角在 LBO 晶体的接受角内,从而 SHG 功率呈现逐渐上升的趋势输出。在三级抽运源电流均为 45 A 时,最大基频功率 53.7 W,SHG 输出 532 nm 激光功率 27.16 W,SHG 效率 50.58%,而且 SHG 功率一直呈现逐渐上升的趋势。获得的三级 SHG 功率与基频功率曲线如图 4 所示。

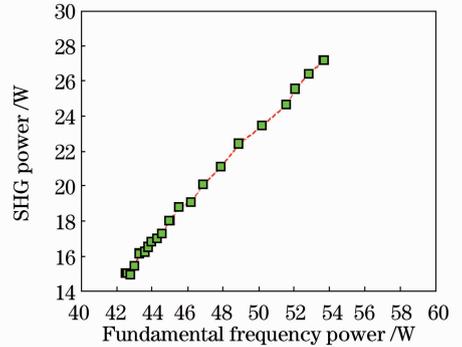


图 4 SHG 532 nm 功率与基频 1064 nm 功率曲线

Fig. 4 Output power of SHG versus fundamental frequency laser

利用温度调谐,精细调节 LBO 温控炉的温度,在温度 59.4°时,输出绿光功率最大达 27.16 W。调谐 LBO 晶体温度与 SHG 功率的变化曲线如图 5 所示,LBO 晶体温度匹配很敏感,受温度影响很大,需要微小调节。当机箱密封时,532 nm 激光功率下降。因为 LBO 温控炉使机箱内温度升高,导致机械

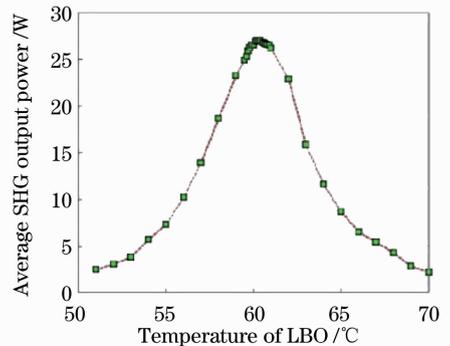


图 5 SHG 功率与 LBO 晶体温度的变化曲线

Fig. 5 Average SHG output power versus LBO crystal temperature

微小的热形变,使 SHG 匹配失谐,SHG 效率降低。

当关掉振荡级电源时,放大级产生自发辐射的功率 13 W,输出绿光 7 mW,说明没有产生自激,一旦振荡级脉冲通过放大级,所有自发辐射能量将转化为放大的皮秒脉冲能量,使皮秒脉冲中不含有纳秒激光背底。

绿光调试过程中,会产生光反馈,影响振荡器使其处于调 Q 锁模状态,所以基频要小角度入射,并在晶体倾斜容差内,避免同轴反射,同时提高系统磁光隔离组件的消光比,至少达到 1000:1 以上。

采集的 532 nm 光束的光斑如图 6 所示,光束质量因子  $M^2$  小于 1.5。绿光连续锁模曲线如图 7 所示。绿光连续锁模稳定,无调 Q 现象,且频率上下抖动小于 10 Hz,连续运转超过 8 h/d。

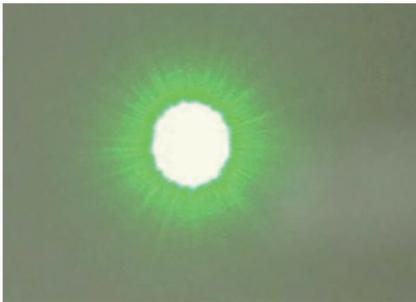


图 6 绿光光斑照片

Fig. 6 Image of green laser spot

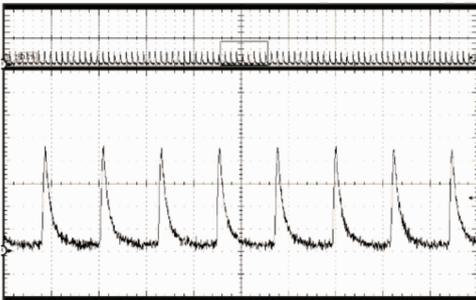


图 7 绿光连续锁模曲线

Fig. 7 Green laser continuous mode-locked curve

由福建福晶公司提供的对于 10 ns, 1064 nm/532 nm 激光镀膜增透膜 LBO 晶体的损伤阈值分别为  $1 \text{ GW/cm}^2$  和  $0.5 \text{ GW/cm}^2$ , 近似换算 1064 nm, 脉宽 10.45 ps, LBO 晶体损伤阈值为  $30.9 \text{ GW/cm}^2$ , 对于 532 nm, 脉宽 10 ps, LBO 晶体损伤阈值  $15.8 \text{ GW/cm}^2$ 。本激光器系统 1064 nm/532 nm 激光分别加载在 LBO 晶体上的峰值功率密度近  $315 \text{ MW/cm}^2$  和  $169 \text{ MW/cm}^2$ , 使系统稳定运转。用

自相关仪测试绿光自相关曲线,皮秒脉宽小于 10 ps。

## 4 结 论

通过三级 Nd:YVO<sub>4</sub> 功率放大系统(LD 抽运双程放大、LD 双端抽运放大和 LD 单端抽运放大), 获得平均功率 50 W 以上的 1064 nm 皮秒激光输出。当输入功率为 6.67 W 时, 经过功率放大, 最高时输出达 53.7 W, 光-光转换效率为 30.07%, 皮秒脉宽 10.45 ps。测试了功率放大器的自相关曲线及光谱。采用 LBO 作为 SHG 晶体, 实现平均功率最高达 27.16 W, 重复频率 80 MHz, 脉宽 10 ps 的 532 nm 绿光输出, SHG 效率达 50.58%。同时, 对 SHG 晶体 LBO 采用一类临界相位匹配配合精细的温度调谐实现高的 SHG 效率。在高功率工作下, 既兼顾了多次功率放大效率, 又使激光器避免热损伤。整体设计在实现高的 SHG 效率的前提下, 保证不损伤 SHG 晶体, 使系统连续稳定工作 8 h 以上。尚需要解决的是皮秒脉冲能量放大效率低的本质问题。

## 参 考 文 献

- 1 P. Dupriez, J. K. Sahu, A. Malinowski *et al.*. 80 W green laser based on a frequency-doubled picosecond, single-mode, linearly-polarized fiber laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics 2006 Technical Digests, Optical Society of America, Washington, D. C., 2006, CThJ1
- 2 Q. Liu, X. Yan, M. Gong *et al.*. 103 W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14335~14340
- 3 E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner *et al.*. 60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 367~369
- 4 L. Guo, W. Hou, H. Zhang *et al.*. Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd:YAG Laser with a semiconductor saturable mirror[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4085~4089
- 5 K. Hong, C. Lai, A. Siddiqui *et al.*. 130 W picosecond green laser based on a frequency-doubled hybrid cryogenic Yb:YAG amplifier[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16911~16919
- 6 R. Peng, L. Guo, X. Zhang *et al.*. 43 W picosecond laser and second-harmonic generation experiment [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(4): 611~613
- 7 Weiwei Wang, Jie Liu, Fei Chen *et al.*. 532-nm picosecond pulse generated in a passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 706~708
- 8 Zhou Guanggang, Lu Guiwu, Yu Yinghui *et al.*. Calculation for linear and nonlinear optical properties of LBO crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1342~1346  
周广刚, 卢贵武, 于迎辉 等. LBO 晶体线性和非线性光学性质的计算[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1342~1346