

21 W、56 MHz Nd:YVO₄皮秒脉冲激光放大器

麻云凤¹ 余 锦¹ 牛 岗² 张 晶² 赵天卓¹ 闫 莹¹ 张 雪¹ 樊仲维^{1,2}

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

摘要 报道了通过激光二极管(LD)单端抽运 Nd:YVO₄晶体的三级功率放大系统,获得稳定的平均功率 21 W 以上的 1064 nm 皮秒激光输出。当重复频率为 56 MHz、平均功率为 4 W 的皮秒种子脉冲注入时,经过三级功率放大,最高功率达 26 W,光-光转换效率达 25%。皮秒单脉冲宽度为 17 ps,连续 1 h 内的功率不稳定性小于 2%,光束质量 M^2 为 1.5。采用 RbTiOPO₄(RTP)电光开关作为打标开关,实现主从脉冲比达 210:1 以上,可以满足打标机的需要。

关键词 激光器;皮秒脉冲;锁模;皮秒激光器;平顶脉冲;电光开关

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0302010

Research on 21 W and 56 MHz Nd:YVO₄ Picosecond Pulse Laser

Ma Yunfeng¹ Yu Jin¹ Niu Gang² Zhang Jing² Zhao Tianzhuo¹

Yan Ying¹ Zhang Xue¹ Fan Zhongwei^{1,2}

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

Abstract Three power amplifier system is reported in which the Nd:YVO₄ crystal is pumped by laser diode (LD), in which 1064 nm picosecond laser output average power is more than 21 W. When the repetition frequency of 56 MHz, the average power of 3 W picosecond seed pulse is injected, a maximum power of 26 W is got by a three-stage power amplifier system with the optical conversion efficiency of 25%. The picosecond pulse duration is less than 17 ps, power instability in 1 h is less than 2%, and the light beam quality M^2 is less than 1.5. A RbTiOPO₄ (RTP) electro-optical switch is as a marking switch and the main-minor pulse ratio is up to 210:1, which is suitable for the use of the marking machine.

Key words lasers; picosecond pulse; mode-locked; picosecond laser; flat-top pulse; electro-optical switch

OCIS codes 140.3480; 140.4050; 140.7090

1 引 言

高功率、高光束质量的超短脉冲激光器的发展,逐步得到了广泛的应用。包括高精细加工、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。2007 年,McDonagh 等^[1]报道了 111 W 的 Nd:YVO₄皮秒脉冲激光放大器,并获得 87 W 的皮秒绿光输出。2008~2009 年,Peng 等^[2,3]报道了 93 W 皮秒脉冲激光放大器,并实现

20.8 W 的绿光输出。2011 年麻云凤等^[4]报道了 53.7 W 的皮秒红外激光器,并实现 27 W 的绿光输出。锁模皮秒激光具有高的峰值功率,更利于材料的精细加工,被学术界称为冷加工。为获得快速的三维标识技术,本文研制了可实现快速关断的高重频皮秒脉冲激光放大器,利用双 RbTiOPO₄(RTP)晶体电光开关,实现关断时间小于 10 ns 的响应时间,最快可达 3 ns,这是声光开关(一般为 30 ns)无

收稿日期: 2012-10-12; **收到修改稿日期**: 2012-11-19

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030205)、中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)和中国科学院光电研究院创新项目(2009AOE002)资助课题。

作者简介: 麻云凤(1981—),女,博士,副研究员,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

法实现的,正是 RTP 高速电光开关驱动的研究及 RTP 晶体的成功生长和应用,促进了此项技术的进步^[5,6]。采用双 RTP 电光开关作为皮秒激光器打标机的斩波开关属国内首次报告。

2 实验装置

实验装置光路如图 1 所示,采用 26 W 波长 808 nm 的 Limo 半导体光纤耦合模块 LD₁ 抽运 Nd:YVO₄ 晶体(C₁),光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.22。采用 1:2 光学耦合系统聚焦到 a-cut,掺杂浓度(粒子数分数)为 0.25%,尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体,晶体双面增镀 1064 nm、808 nm 增透膜。采用 BATOP 公司的半导体可饱和吸收反射镜(SESAM),其调制深度为 2%,饱和通量为 60 μJ/cm²,饱和恢复时间为 1 ps。其中 M₃, M₂, M₅, M₆ 为平面反射镜, M₄, M₇ 曲率半径分别为 2000 mm 和 600 mm。M₈ 为 15% 耦合输出镜;种子光经 M₉ 反射,并经模式匹配透镜 L₁ 准直,通过隔离组件。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 λ/2 波片,隔离组件均增镀 1064 nm 增透膜。采用三级功放系统进行功率放大,抽运源均采用 32 W Limo 半导体光

纤耦合模块 LD₁, LD₂, LD₃, 光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.22,分别采用 1:1, 1:1 和 1:2 的光学耦合系统聚焦。种子光经 M₁₀, M₁₁ 反射,再经模式匹配透镜 L₂ 聚焦到一级功放增益介质 Nd:YVO₄ (C₂),经 M₁₂, M₁₃ 镜反射,再经模式匹配透镜 L₃ 聚焦到二级功放增益介质 Nd:YVO₄ (C₃);经 M₁₄ 反射,再经模式匹配透镜 L₄ 聚焦,经 M₁₅ 镜反射到三级功放增益介质 Nd:YVO₄ (C₄);经 M₁₆ 反射,再经 λ/2 波片将水平偏振光转换为垂直偏振光,经 L₅ 准直,再经 M₁₇ 反射,通过偏振分光棱镜 PBS₃、RTP 电光开关、偏振片 P 透射输出。其中, M₁₀、M₁₁、M₁₃、M₁₅、M₁₇、M₁₈、M₁₉ 均为 45° 反射镜,且增镀 1064 nm 高反膜; M₁₂、M₁₄、M₁₆ 均为 45° 反射镜,且一面增镀 1064 nm 高反膜,两面均镀 808 nm 增透膜;模式匹配透镜及准直透镜 L₁, L₂, L₃, L₄, L₅ 均为平凸镜,焦距分别为 200, 80, 80, 200, 200 mm,且双面增镀 1064 nm 增透膜;电光开关 RTP 晶体、偏振片 P,透光面均镀 1064 nm 增透膜,电光开关加半波电压 1578 V;废光收集器(W),用来收集偏振片反射的垂直偏振光,通过 RTP 晶体光斑大小为 2 mm; K₁, K₂, K₃, K₄ 为抽运光 808 nm 的废光收集小孔。

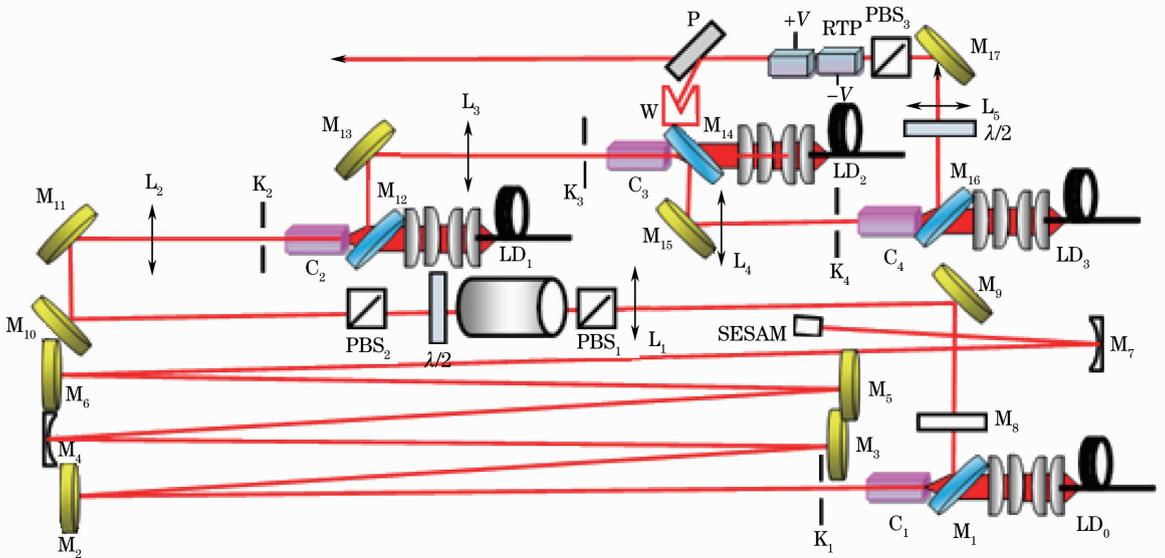


图 1 高功率锁模皮秒激光器系统装置图

Fig. 1 Experimental schematic of the high power mode-locked picosecond 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为 7%,种子光垂直偏振纯度为 96%,整个隔离组件共损耗为 9%。在连续抽运情况下,晶体损伤阈值为 22 kW/cm²,安全功率密度应该控制在 19 kW/cm²

以下。

种子光光-光转换效率达 15%,当注入三级功率放大器平均功率为 4 W 时,1064 nm 基频光一级功放平均功率达 12 W,光光转换效率达 25%;二级功放平均功率达 19 W,光光转换效率近 22%;三级

功放平均功率达 26 W, 光光转换效率近 16%, 三级功放效率见图 2。因为热效应的影响, 为了保证光束质量, 牺牲了部分效率。采用相干功率计 Field Max II 测试, 每 0.1 s 采样一个点, 共采样 10000 个点, 计算时间为 16.67 min, 平均功率为 26.29 W, 不稳定性小于 0.117%, 功率稳定性数据曲线如图 3 所示。激光器连续工作超过 6 h, 平均功率稳定在 26 W, 不稳定性小于 2%, 满足工业加工对稳定性的要求。功率的稳定性受水箱及激光器工作环境温度影响敏感, 保持水箱在通风空间内工作, 系统稳定性会进一步提高。

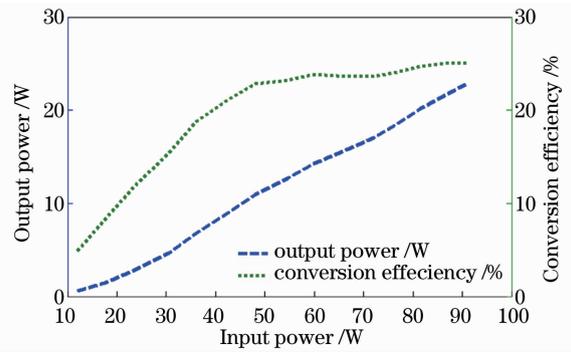


图 2 三级功放光-光转换效率

Fig. 2 Optical conversion efficiency of three stage amplifier

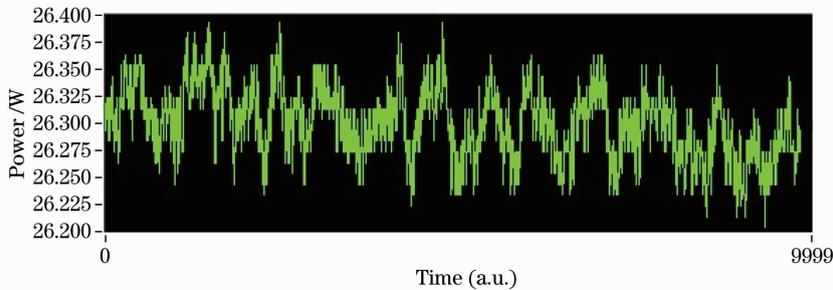


图 3 功率稳定性曲线

Fig. 3 Curve of power stability

调节各级功放电流, 当功率为 23 W 时, 利用模拟信号发生器输入给电光驱动电源 0.01 Hz, 5 V 的方波 TTL 信号, 即时间周期为 100 s 的一个高电平信号, 获得功率调制曲线如图 4 所示。上升沿下降沿小于 10 ns, 满足工业标识的速度要求。当高电平时, 输出光功率为 23.11 W; 低电平时, 输出光功

率为 110 mW。电光开关无法像机械开关一样, 完全关断光脉冲, 原因在于电光晶体本身的热退偏现象、偏振器件的消光比和波片旋光特性, 限制了系统完全消光, 消光比为 210:1。在连续工作过程中, 由于热积累, 消光比会下降。微弱的漏光导致不能加工塑料样品, 更适合于金属材料加工标识。

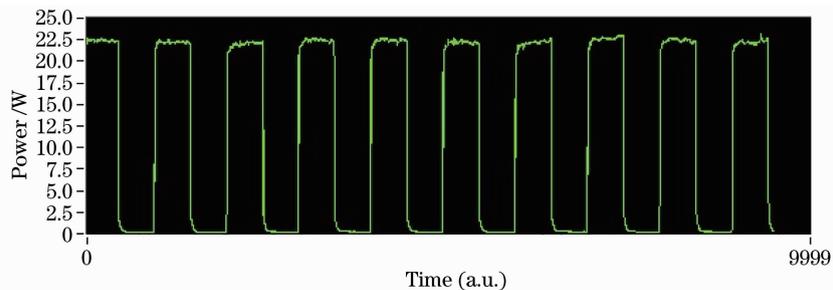


图 4 功率调制的平顶脉冲曲线

Fig. 4 Fat-top curve of modulated power

当输入周期的 TTL 信号, 利用光电探测器观测锁模脉冲激光散射光信号, 获得锁模频率为 56 MHz, 锁模稳定。高电平时输出光锁模曲线如图 5(a) 所示, 低电平时无信号输出如图 5(b) 所示, 在示波器上, 周期地观测到有光信号与无光信号时的波形。

进一步利用频谱仪测量频谱, 获得射频 (RF) 谱主峰与次峰峰值大于 65 dB, 曲线如图 6 所示。此指标反映了锁模的稳定性, 一般大于 50 dB 即为稳定锁模。

在平均功率为 23 W 时, 利用自相关仪测试皮秒激光脉冲宽度为 17 ps, 自相关曲线如图 7 所示。

按照高斯型计算, 皮秒激光脉宽为 $0.707 \times 2x \times t / (0.3 \text{ s})$, 其中 t 为测量的正脉冲宽度 (取

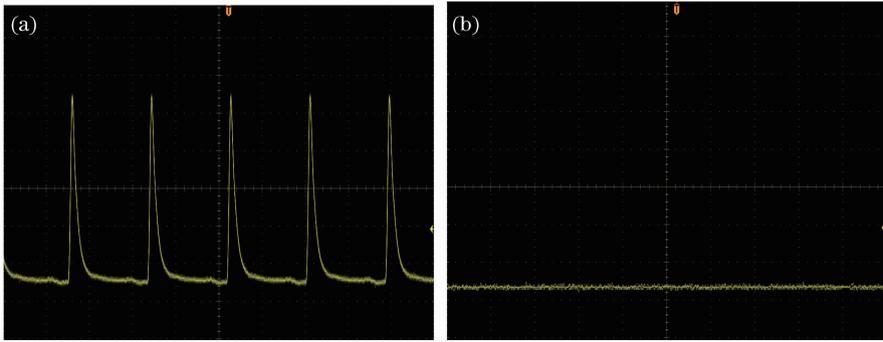


图 5 TTL 周期信号输入时光信号的调制曲线。(a) 高电平时输出光的锁模曲线；(b) 低电平时无激光输出
Fig. 5 Modulated curves of optical signal with a TTL periodic signal. (a) Mode-locked laser signal in a high voltage signal state; (b) no laser output in a low voltage signal state

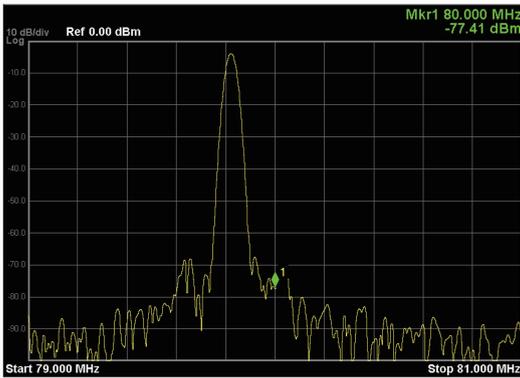


图 6 皮秒激光的射频谱线

Fig. 6 RF spectra curve of picosecond laser

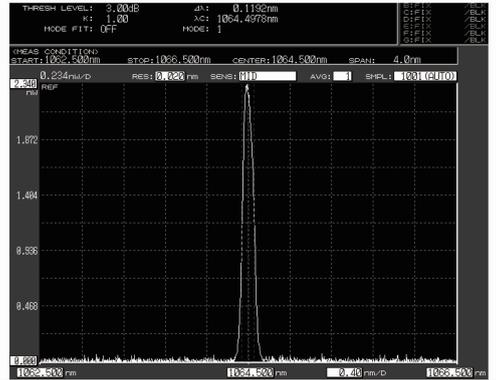


图 8 功率放大级光谱曲线

Fig. 8 Optical spectra curve of power amplifier

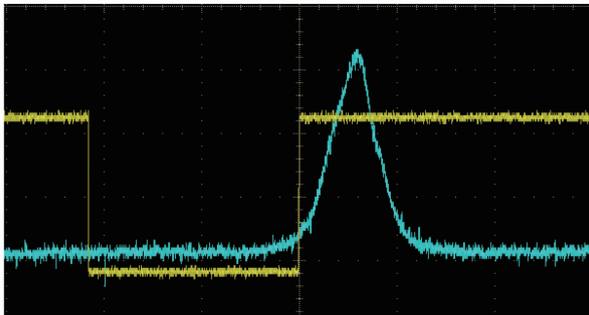


图 7 皮秒激光的自相关曲线

Fig. 7 Autocorrelation curve of picosecond laser

5 ms), x 为固定臂移动距离(取 7.2 mm), s 为自相关曲线移动距离(取 10 ms)。测试功率放大器光谱曲线, 测试光谱为 1064.5039 nm, 谱宽为 0.12 nm, 激光脉宽为 17 ps, 带宽脉宽积为 0.54, 接近高斯型理想脉宽带宽积为 0.44, 功率放大光谱曲线如图 8 所示。

测量放大级光束质量 M^2 因子, 如图 9 所示, 两个方向质量因子均为 1.5。

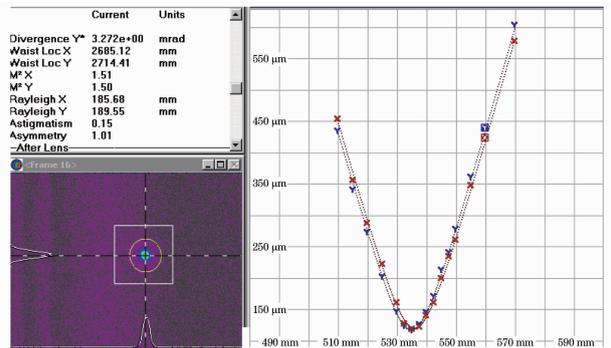


图 9 激光光束质量

Fig. 9 Beam quality of laser

统, 获得平均功率为 26.29 W 的 1064 nm 皮秒激光输出, 功率稳定性小于 0.12%。当注入功率为 4 W 时, 经过功率放大, 光光转换效率最高达 26%, 皮秒脉宽为 17 ps, 并测试功率放大器光谱宽度为 0.12 nm, 带宽脉宽积达 0.54, 接近高斯型理想带宽脉宽积 0.47。光束质量 M^2 达 1.5, 锁模脉冲主次脉冲相差 0.65 dB。采用双 RTP 电光开关实现斩波的作用, 消光比达 210:1。整个系统已实现对金属的精细标识加工, 尚需要解决的问题是 RTP 电光开关长时间工作消光比下降问题及消光比继续提高问题。

4 结 论

本文通过三级 Nd:YVO₄ 单端抽运功率放大系

参 考 文 献

- 1 Louis McDonagh, Richard Wallenstein, Achim Nebel. Mode-locked TEM₀₀ Nd:YVO₄ master oscillator power amplifier pumped at 888 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10): 1259~1261
 - 2 Runwu Peng, Lin Guo, Xiaofu Zhang *et al.*. Picosecond laser amplification system with 93 W high average power[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(10): 2879~2882
 - 3 Runwu Peng, Lin Guo, Xiaofu Zhang *et al.*. 43 W picosecond laser and second-harmonic generation experiment [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(4): 611~613
 - 4 Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang *et al.*. 25-W high repetition rate picosecond green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202010
 - 5 Ma Yunfeng, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. 2.5 W picosecond pulse regenerative amplifier with 100 kHz repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2825~2828
 - 6 Liu Xiaofeng, Gao Yanwei, Huang Yongzong *et al.*. Q-switched characteristics of RTP crystals [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1): 15~17
- 麻云凤, 余 锦, 牛 岗 等. 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器 [J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1202010
- 麻云凤, 樊仲维, 牛 岗 等. 重复频率 100 kHz、平均功率 2.5 W 的皮秒脉冲再生放大器 [J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2825~2828
- 刘晓峰, 高彦伟, 黄永宗 等. RTP 晶体的调 Q 特性研究 [J]. 光学与光电技术, 2008, **6**(1): 15~17

栏目编辑: 宋梅梅