

# SESAM 无损伤运转的大功率高重复频率皮秒激光器

黄玉涛<sup>1,2,3</sup> 王璐璐<sup>1,2</sup> 石朝辉<sup>1,3</sup> 樊仲维<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

**摘要** 提出一种可实现大功率输出、重复频率为 80 MHz 的皮秒锁模振荡器, 当抽运功率为 22.4 W 时, 可实现功率为 5.1 W, 频谱信噪比大于 60 dB, 脉冲宽度为 23.7 ps 的皮秒脉冲的稳定输出。通过选择合理的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 参数和合适的腔型, 实现 SESAM 长期无损伤运转并进行 500 h 的实验验证。采用 888 nm 激光二极管 (LD) 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的两级功率放大系统将皮秒锁模振荡器的功率提升至 44 W。放大系统的光-光转换效率大于 25%, 输出光具有良好的光斑模式, 光束质量因子  $M^2 < 1.5$ 。

**关键词** 激光器; 皮秒锁模振荡器; 半导体可饱和吸收镜; 激光放大; 888 nm 抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802010

## High-Power and High Repetition-Rate Picosecond Laser with No Damage in SESAM

Huang Yutao<sup>1,2,3</sup> Wang Lulu<sup>1,2</sup> Shi Zhaohui<sup>1,3</sup> Fan Zhongwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China

**Abstract** A high-power picosecond mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser system with high repetition-rate of 80 MHz is reported. When the pump power is 22.4 W, the oscillator provides the output power of 5.1 W with signal-to-noise ratio more than 60 dB and a pulse duration of 23.7 ps. The semiconductor saturable-absorber mirror (SESAM) of oscillator can work for more than 500 h without any damage by selecting reasonable SESAM parameters and suitable cavity. The power is amplified to 44 W by two stages of power amplifier end-pumped by a continuous-wave 888 nm laser diode (LD). Optical-optical conversion efficiency of amplified system is more than 25%. The beam quality factor  $M^2$  after amplification is less than 1.5.

**Key words** lasers; picosecond mode-locked oscillator; semiconductor saturable-absorber mirror; laser amplification; 888 nm pumping

**OCIS codes** 140.3280; 140.3280; 140.3330; 320.7090

## 1 引言

高功率、高光束质量、高重复频率的皮秒激光器因具有高的峰值功率可以作为准连续光源实现深紫外到中红外波段的皮秒激光输出, 其在非线性频率变换、激光显示、激光刻蚀等领域有着广泛应用<sup>[1-5]</sup>。Peng 等<sup>[6]</sup>报道了重复频率为 73.3 MHz, 平均功率为 92.7 W, 脉冲宽度为 26.5 ps 的皮秒激光器。麻云凤等<sup>[7]</sup>报道了通过半导体激光二极管 (LD) 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的三级功率放大系统, 实现平均功率为 21 W、重复频率为 56 MHz

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-04-10

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)、北京市科委科技新星计划(xx2012084)

作者简介: 黄玉涛(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态皮秒激光技术方面的研究。E-mail: yutahuang@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型复杂激光技术等方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com

的稳定的皮秒激光输出。McDonagh等<sup>[8]</sup>报道了重复频率为110 MHz,平均功率为111 W的Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒激光器。以上报道的大功率高重复频率皮秒激光器都是利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现锁模的,但运转在瓦量级功率的SESAM极易受到热损伤和峰值功率损伤<sup>[9-11]</sup>。为了实现大功率高重复频率皮秒激光器的长期稳定性,必须解决SESAM的损伤问题。

通过选择合理的SESAM参数和合适的腔型,设计可以实现SESAM长期无损伤运转的皮秒锁模振荡器。功率放大部分采用连续波888 nm LD端面抽运方式,有效降低晶体热效应,实现高光束质量的激光放大。最终获得脉冲重复频率为80 MHz,平均功率为44 W的激光输出,输出激光具有良好的光束质量。

## 2 实验装置及原理

实验装置如图1所示,高重复频率皮秒激光系统包括锁模振荡器和功率放大器两部分。锁模振荡器的抽运源 pump1 采用 LIMO 公司生产的 30 W LD(输出波长为 808 nm,耦合光纤纤芯直径为 400 μm,数值孔径 NA=0.22),抽运光经放大比例为 1:2 的耦合系统耦合到 C1 晶体(Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,掺杂粒子数分数为 0.3%,体积为 3 mm×3 mm×10 mm,a 向切割,双面镀 1064 nm/808 nm 增透膜)。振荡光经 OC、M3、M2、M1、M0 聚焦到 SESAM 上,其中 OC 为激光透过率为 15% 的输出镜;M3 为 45° 的二向色性反射镜,抽运光入射面镀有 808 nm 增透膜,另一面镀有 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜;M2 和 M1 为镀有 1064 nm 全反膜的平凹镜,曲率半径为 2000 mm;M0 为镀有 1064 nm 全反膜的平凹镜,曲率半径为 400 mm;采用 BATOP 公司生产的 SESAM(调制深度 ΔR=0.5%,非饱和损耗为 0.5%,饱和恢复时间为 1 ps,损伤阈值为 1 GW/cm<sup>2</sup>,饱和通量为 90 μJ/cm<sup>2</sup>)实现锁模。皮秒锁模振荡器输出的激光经 M4 和 M5 两个镀 1064 nm 全反膜的 45° 折转镜进入放大系统。偏振片(TFP)、法拉第旋光器(FR)和 1/2 波片(HWP)组成光隔离系统,可以防止放大系统中的激光返回到振荡器,影响锁模的稳定性;lens1 为焦距为 300 mm 的平凸透镜,用于匹配振荡器和功率放大系统之间的光斑模式;功率放大系统由两级单程放大器组成,C2 和 C3 晶体为功率放大系统的增益晶体,晶体均采用 a 向切割的 4 mm×4 mm×20 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,掺杂粒子数分数为 0.8%,双面镀 1064 nm/888 nm 增透膜;lens2 为焦距为 200 mm 的平凸透镜,用于匹配两级功率放大之间的光斑模式。M6、M7、M8、M9 为 45° 的二向色性反射镜,抽运光入射面镀 888 nm 增透膜,另一面镀 1064 nm 高反膜和 888 nm 增透膜。功率放大系统中的抽运源 pump2 和 pump3 各采用 100 W LD(输出波长为 888 nm,耦合光纤纤芯直径为 400 μm,数值孔径 NA=0.22),抽运光经放大比例为 1:2 的耦合系统耦合到增益晶体。为了提高晶体对 888 nm 抽运光的吸收效率,将透射出晶体的抽运光经光束整形后再次反射进晶体。

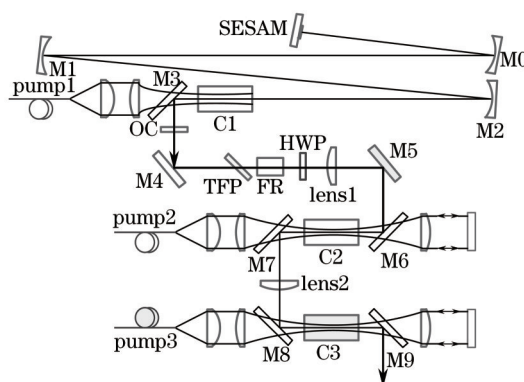


图1 高重复频率皮秒激光系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the picosecond laser with high repetition rate

实验过程中 SESAM 受到损伤的原因主要有两种:一种是由于 SESAM 的温度升高而引起的热损伤, SESAM 中沉积的热功率可表示为

$$P_{dis} \approx fE_{sat,A} \Delta R + fE_p \Delta R_{ns}, \quad (1)$$

式中  $f$  为腔内振荡皮秒脉冲的重复频率;  $E_{sat,A}$  为 SESAM 的饱和能量;  $E_p$  为腔内脉冲能量,正常工作情况下  $E_p$  远大于  $E_{sat,A}$ ;  $\Delta R_{ns}$  为非饱和损耗。由(1)式可看出 SESAM 大部分热量是由非饱和损耗引起的。为了减少

热量积累,可以选择非饱和和损耗较小的 SESAM 和降低腔内脉冲能量。表 1 为厂家提供常用 SESAM 的非饱和和损耗和调制深度。型号为 SAM-1064-0.5 的 SESAM 的非饱和损耗最小,产生的热量积累也最小。由锁模理论<sup>[12]</sup>可知锁模脉冲宽度  $\tau_p \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta R}}$ 。为了兼顾锁模的脉冲宽度和 SESAM 的热效应,实验中选用型号为 SAM-1064-1 的 SESAM。

表 1 不同型号 SESAM 的非饱和损耗和调制深度

Table 1 Non-saturable losses and modulation depth of different models of SESAM

Model	Non-saturable losses $\Delta R_{ns}/\%$	Modulation depth $\Delta R/\%$
SAM-1064-0.5	0.2	0.3
SAM-1064-1	0.5	0.5
SAM-1064-2	1.2	0.8

另一种是调 Q 锁模产生的高峰值能量脉冲很容易使 SESAM 受到损伤。由锁模理论可知,实现连续(CW)锁模的条件为

$$E_p^2 > F_{sat,L} A_L F_{sat,A} A_A \Delta R, \quad (2)$$

式中  $F_{sat,L} = hv_L/m\sigma_L$  为增益介质的饱和通量;  $F_{sat,A}$  为 SESAM 的饱和通量;  $A_L$  和  $A_A$  分别为在增益晶体和 SESAM 上的振荡光斑的面积。由(2)式可知,增大腔内脉冲能量  $E_p$  可以抑制调 Q 锁模实现连续锁模。图 2 为模拟的腔内脉冲能量和输出功率随输出镜透过率的变化曲线,减小输出镜的透过率可以提高腔内脉冲能量  $E_p$ ,但是透过率的减小也会使振荡器输出功率变小。为了保证锁模振荡器获得大于 5 W 的功率输出,选用透过率  $T=15\%$  输出镜。

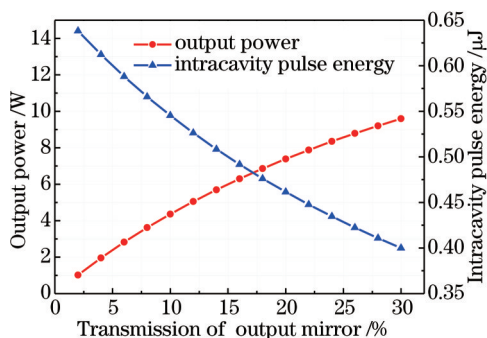


图 2 输出功率和腔内脉冲能量随输出镜透过率变化曲线

Fig.2 Output power and intracavity pulse energy versus the transmission of output mirror.

减小增益晶体和 SESAM 的光斑面积有利于实现连续锁模,但过小的  $A_L$  和  $A_A$  会导致增益晶体和 SESAM 出现损伤。所以在设计锁模振荡器时要合理控制增益晶体上和 SESAM 上的振荡光斑的面积。为了保证 30 W 高功率抽运时增益晶体的安全,增益晶体 Nd:YVO<sub>4</sub> 上的抽运光斑直径选为 0.8 mm。此时晶体的热透镜焦距约为 600 mm。在此基础上设计了振荡器谐振腔,计算模拟出的腔内光斑模式分布如图 3 所示。可以看出增益晶体 C1 上光斑半径为 350 μm 时,能够实现抽运光斑与振荡光斑之间合理的模式匹配。当平凹镜 M0 的曲率半径为 400 mm 时,SESAM 上的光斑半径为 110 μm。

同时还计算模拟了增益晶体和 SESAM 上的振荡光斑随热透镜焦距的变化情况,如图 4 所示。由模拟结

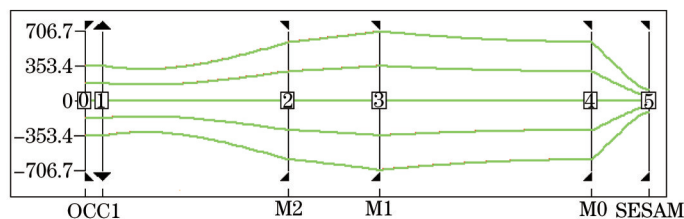


图 3 锁模振荡器腔内模式分布示意图

Fig.3 Schematic diagram of mode distribution in the mode-locked oscillator

果可知,热透镜焦距在0.4~0.8 m范围内,增益晶体和SESAM上振荡光斑半径变化较小,振荡器具有较长的锁模稳区,抽运功率的变化对锁模的稳定性影响较小。

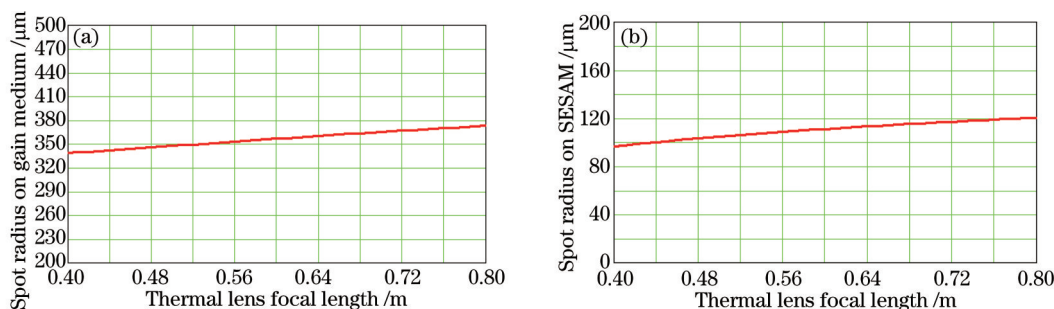


图4 (a) 增益晶体和 (b) SESAM 上的光斑随热透镜焦距的变化

Fig.4 Variations in mode spot-radius on (a) gain medium and (b) SESAM with thermal focal length

对于 Nd:YVO<sub>4</sub> 增益晶体,受激发射截面  $\sigma_L = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 普朗克常数  $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $v_L = c/\lambda$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , 脉冲往返一次通过 Nd:YVO<sub>4</sub> 的次数  $m = 2$ , 计算可得饱和通量  $F_{\text{sat,L}} = 3.72 \times 10^4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ; SESAM 的饱和通量和调制深度分别为  $F_{\text{sat,A}} = 90 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  和  $\Delta R = 0.5\%$ ; 将上述参数代入 (2) 式可得  $F_{\text{sat,L}} A_L F_{\text{sat,A}} A_A \Delta R = 0.024 \mu\text{J}^2$ ; 假设振荡器的输出功率  $P_{\text{out}} = 6 \text{ W}$ , 腔内振荡的平均功率  $P_{\text{intra}} = P_{\text{out}}/T \approx 40 \text{ W}$ , 输出镜的透过率  $T = 15\%$ 。腔内脉冲能量  $E_p = P_{\text{intra}}/f$ , 其中脉冲重复频率  $f \approx 80 \text{ MHz}$ , 经计算得  $E_p = 0.5 \mu\text{J}$ 。此时振荡器腔内能量满足  $E_p^2 > F_{\text{sat,L}} A_L F_{\text{sat,A}} A_A \Delta R$ , 因此谐振腔可以实现连续锁模。由 (1) 式可得此时 SESAM 上积累的热功率非常小, 约为  $P_{\text{dis}} \approx 0.2 \text{ W}$ 。SESAM 表面的最高温度  $\Delta T_{\text{max}}$  (光斑中心处) 可表示为

$$\Delta T_{\text{max}} \approx \frac{P_{\text{dis}}}{\sqrt{2\pi} K \omega_{\text{SESAM}}}, \quad (3)$$

其中  $\omega_{\text{SESAM}}$  是 SESAM 上的光斑半径。K 是 SESAM 的热导率, 一般取值为  $45 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 。由 (3) 式计算出 SESAM 上最高温度  $\Delta T_{\text{max}} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ , 避免 SESAM 因温度过高产生热损伤。同时 SESAM 自身的铜质热沉具有良好的散热特性, 可保证 SESAM 长期处于安全的运转状态。

采用端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的功率放大技术具有较高的放大效率, 可以进一步提高激光输出功率, 并能保证输出光具有良好的光束质量。但 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热断裂问题制约了注入晶体的抽运功率, 晶体断裂后会导致放大效率下降和光束质量劣化。相对于传统的 808 nm 抽运, 采用 888 nm 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体可以允许更高的注入抽运功率, 这是因为 888 nm 抽运为直接抽运, 可以减少抽运光和振荡光之间的量子亏损, 能够大幅度降低晶体上的热量累积, 从而减少由热量累积所引起的热应力等不良因素。除此之外, 相对于 808 nm, 晶体对 888 nm 的吸收系数较低, 使得晶体对抽运光的吸收更分散, 避免大量热量集中在晶体端面, 晶体内部的热分布相对均匀。但这会减少晶体对抽运光的吸收, 因此可以通过提高晶体的掺杂浓度和增加晶体长度来提高抽运光的吸收率。实际测量了功率放大系统中增益晶体 Nd:YVO<sub>4</sub> 的吸收率为 60%。为了进一步提高抽运光的吸收率, 将透射出晶体的抽运光经光束整形后反射进晶体进行二次吸收, 最终晶体对抽运光的吸收率为 84%。

### 3 实验结果与讨论

连续锁模时输出光的功率与抽运功率间的关系如图 5 所示。振荡器实现连续锁模的抽运阈值为 15.9 W, 实验时抽运功率在 15.9~28.7 W 范围内都能实现稳定的连续锁模, 最高输出功率为 7.5 W。为了避免 SESAM 的损伤, 保证激光器长期稳定工作, 选择抽运功率为 22.4 W, 此时锁模振荡器的输出功率为 5.1 W, 光-光转换效率达 22.8%。

用高速硅光电探头 (DET10A, ThorlabsInc) 接收脉冲信号并分别连接至数字示波器 (DPO4104, TektronixInc) 和频谱分析仪 (N9020A, AgilentInc)。图 6 为不同时间尺度和扫描范围下采集到的皮秒脉冲的波形图和频谱图, 图 6(a) 为时间间隔为 2  $\mu\text{s}$  时皮秒脉冲的波形图, 可以看出振荡器为稳定的连续锁模, 锁模脉

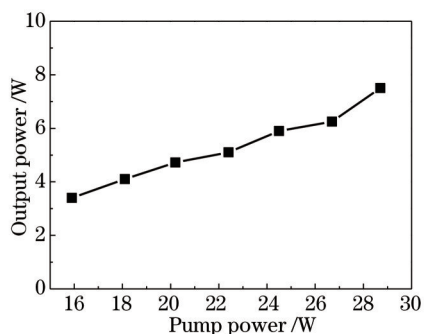


图5 连续锁模时振荡器输出功率随抽运功率的变化

Fig.5 Output power versus pump power when oscillator works in CW mode-locking

冲序列无周期调制现象;图6(b)为时间间隔为10 ns时皮秒脉冲的波形图,可以看出锁模脉冲的重复频率为80 MHz,并且具有良好的脉冲稳定性,其脉冲稳定性均方根值小于2%;图6(c)为扫描范围为320 MHz下皮秒脉冲的频谱图,可以看出锁模脉冲的频谱非常稳定,无噪声频率出现;图6(d)为扫描范围为85.10 kHz下皮秒脉冲的频谱图,可以看出频谱信噪比大于60 dB。通过对锁模振荡器输出皮秒脉冲的时间和频谱信号的分析可以确定锁模振荡器处于良好的锁模状态。

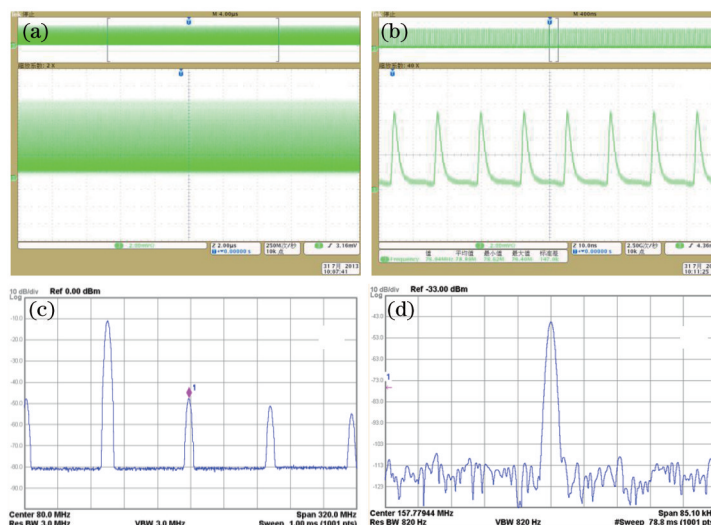


图6 皮秒脉冲的时间和频谱信号。时间间隔分别为(a) 2 μs和(b) 10 ns时皮秒脉冲的波形图;扫描范围分别为(c) 320 MHz和(d) 85.10 kHz时皮秒脉冲的频谱图

Fig.6 Screenshots of time signals and frequency signals of picosecond pulses. Time signals of picosecond pulses

in time interval of (a) 2 μs and (b) 10 ns; frequency signals of picosecond pulses in scan span of (c) 320 MHz and (d) 85.10 kHz

用自相关仪(FR-103XL, FemtochromeInc)和光谱仪(AQ6370B, YokogawaInc)对皮秒脉冲的特性进行测量,图7为皮秒脉冲的时间特性和光谱特性。图7(a)为皮秒脉冲的自相关曲线,可以看出自相关曲线为高斯

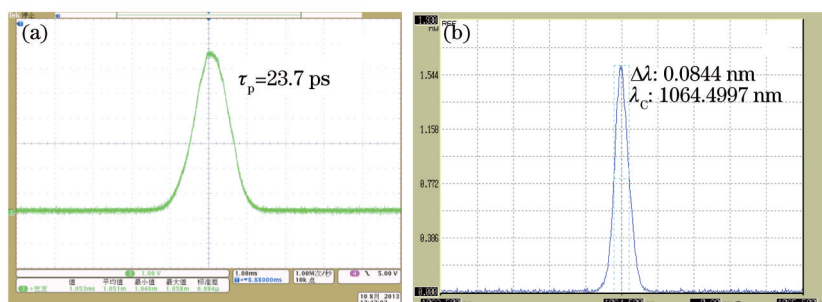


图7 皮秒脉冲的(a)自相关曲线和(b)光谱图

Fig.7 (a) Intensity autocorrelation trace and (b) optical spectrum of the picosecond pulses

型,脉冲宽度  $\tau_p = 23.7$  ps;图 7(b)为皮秒脉冲的光谱特性,可以看出中心波长为 1064.50 nm,光谱宽度为 0.084 nm。根据公式  $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$  ( $c$  为真空中的光速)可得锁模脉冲的频谱宽度  $\Delta\nu = 21.9$  GHz,则脉冲的时间带宽积  $\tau_p \cdot \Delta\nu = 0.52$ ,是理论值 0.44(高斯型)的 1.18 倍。

在经历 500 h 的长期稳定性实验后,锁模振荡器锁模稳定,未出现失锁或调  $Q$  锁模。用高倍显微镜观察实验前后的 SESAM,其表面情况如图 8 所示。可以看出实验后的 SESAM 表面并未出现损伤,说明该锁模振荡器可实现长期稳定运转。

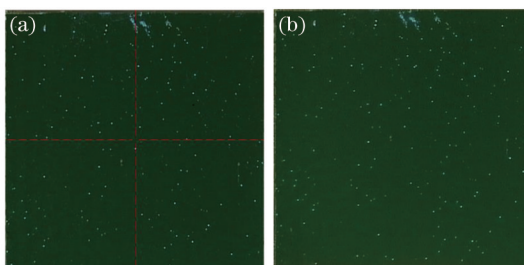


图 8 长期稳定性(a)实验前和(b)实验后的 SESAM 表面情况

Fig.8 SESAM's surfaces (a) before and (b) after long-term stability experiment

两级功率放大过程中输出功率随抽运功率的变化情况如 9 所示。两级功率放大器各自注入的最大抽运功率为 76 W,锁模振荡器输出的皮秒脉冲经过一级和二级功率放大后的功率分别为 22.8 W 和 44 W,提取功率分别为 17.7 W 和 21.2 W。功率放大系统的光-光转换效率大于 25%。经过两级功率放大后,脉冲宽度为 24.3 ps,相对于锁模脉冲振荡器略有展宽。

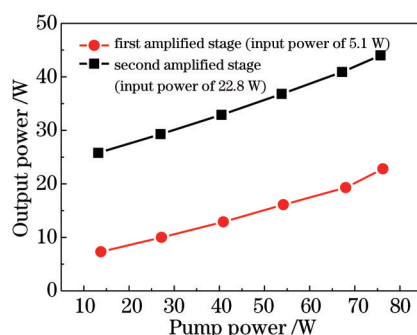


图 9 两级功率放大过程中输出功率随抽运功率的变化情况

Fig.9 Output power versus pump power for the first amplified stage and second amplified stage

功率放大后激光的光斑模式如图 10 所示,可见放大后的激光具有良好的光斑模式,经测量  $X$  轴和  $Y$  轴的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.49 和 1.45,光束质量因子  $M^2$  小于 1.5。

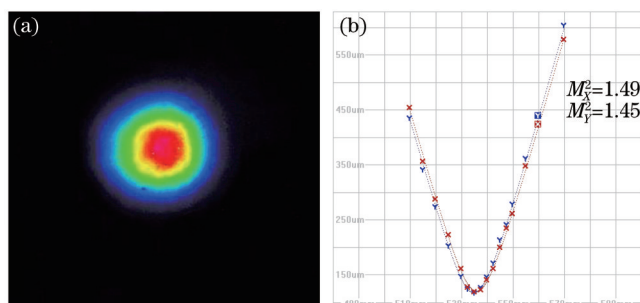


图 10 功率放大后激光的光斑模式及  $M^2$  测试曲线

Fig.10 Spatial profile and  $M^2$  test curve after power amplification

## 4 结 论

提出一种可实现大功率输出的皮秒激光系统。该系统的皮秒锁模振荡器可实现 SESAM 长期无损伤运转,

输出功率为 5.1 W。功率放大部分的抽运源采用 888 nm 的直接抽运方式,有效降低了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体上的热效应避免了晶体的损伤。最终系统输出皮秒脉冲的重复频率为 80 MHz,功率为 44 W,光束质量因子  $M^2 < 1.5$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Wang Shutang. Development of visible ultrashort pulse laser realized by semiconductor saturable absorption mirror as an absorber for passive modelocking[J]. Optical Technique, 2004, 30(3): 367-369.  
王勇刚, 马骁宇, 王树堂. 半导体可饱和吸收镜作为被动锁模吸收体实现超短脉冲可见激光发展状况[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 367-369.
- 2 Li Li, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Experimental research on 12.5  $\mu$ J electro-optical cavity-dumped mode-locked picosecond laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 58-62.  
李 丽, 樊仲维, 余 锦, 等. 12.5  $\mu$ J 电光腔倒空锁模皮秒激光器的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 58-62.
- 3 Huang Yutao, Fan Zhongwei, Niu Gang, *et al.*. 100 kHz repetition rate picosecond regenerative amplifier with high pulse stability[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502009.  
黄玉涛, 樊仲维, 牛 岗, 等. 高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502009.
- 4 Cai Zhiqiang, Wen Wuqi, Yao Jianquan, *et al.*. Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 734-738.  
蔡志强, 温午麒, 姚建铨, 等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 734-738.
- 5 Li Bin, Ding Xin, Zhang Wei, *et al.*. 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by wave-locked 878.6 nm laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502010.  
李 斌, 丁 欣, 张 巍, 等. 波长锁定 878.6 nm 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm 激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502010.
- 6 Runwu Peng, Lin Guo, Xiaofu Zhang, *et al.*. Picosecond laser amplification system with 93 W high average power[J]. Optics Communications, 2008, 281(10): 2879-2882.
- 7 Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang, *et al.*. Research on 21 W and 56 MHz Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0302010.  
麻云凤, 余 锦, 牛 岗, 等. 21 W、56 MHz Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒脉冲激光放大器[J]. 中国激光, 40(7): 0302010.
- 8 Louis McDonagh, Richard Wallenstein, Achim Nebel. 111 W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator power amplifier pumped at 888 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(10): 1259-1261.
- 9 Zhang Jing, Joerg Neuhaus, Thomas Dekorsy. Study on damage mechanism of semiconductor saturable absorber mirror[J]. J Changchun University of Science and Technology, 2011, 34(4): 20-26.  
张 靓, Joerg Neuhaus, Thomas Dekorsy. 半导体可饱和吸收镜的损伤机制研究[J]. 长春理工大学学报, 2011, 34(4): 20-26.
- 10 Li Jianping, Cao Shiyong, Wu Zubin, *et al.*. Measurement of damage threshold of semiconductor saturable-absorber mirrors[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2): 142-145.  
李建萍, 曹士英, 吴祖斌, 等. 半导体可饱和吸收镜的光损伤阈值测量[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2): 142-145.
- 11 Fu Jie, Chen Meng, Li Gang, *et al.*. Research on mechanism of mode locking using semiconductor saturable absorption mirror in a solid laser of pico-second[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2011, 17(2): 150-153.  
付 杰, 陈 檬, 李 岗, 等. 半导体可饱和吸收镜实现固体激光器皮秒锁模的机理研究[J]. 量子光学学报, 2011, 17(2): 150-153.
- 12 R Paschotta, U Keller. Passive mode locking with slow saturable absorbers[J]. Appl Phys B, 2001, 73: 653-662.

栏目编辑: 张 雁