

9 W 级高功率 SESAM 锁模 Nd : YVO₄ 激光器^①

杨西光 王勇刚 王江 汪太进 陈振东

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

摘要 通过 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 晶体, 以半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为被动锁模器件, 利用 ABCD 传输矩阵法和 MATLAB 软件设计具有良好热稳定性和超大稳区的 X-型五镜折叠谐振腔, 实现了高效率和高功率的连续稳定锁模运转. 在泵浦功率 30 W 时得到 1 064 nm 波长最大 9 W 的稳定锁模输出, 脉冲重复频率为 108.28 MHz, 脉宽为 9.53 ps, 对应最大单脉冲能量 84.04 nJ, 激光器的斜效率达到 31.7%. 以此为种子源放大可直接获得百瓦级高功率锁模激光输出.

关键词 LD 泵浦; Nd : YVO₄ 激光; SESAM; 被动锁模; 皮秒脉冲

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

全固态锁模激光器因具有结构简单、稳定可靠、斜效率高、光束质量好等优点, 在国防, 工业, 医疗和科研等领域有着极为广阔的应用前景^[1]. 1992 年, Keller^[2]首次把半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 运用于被动锁模激光器. 现在, SESAM 已成为商业领域 ps 量级最理想的被动锁模元件之一^[3, 4], 被广泛地用在各种锁模激光器中.

近年来, 国内外利用 SESAM 作为锁模元件, 在激光二极管 (LD) 侧面及端面泵浦的多种 Nd³⁺ 激光器中实现皮秒量级锁模运转^[5]. 1999 年, 国外已经报道了 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 实现 10.7 W 波长 1 064 nm 连续锁模激光输出^[6]; 2009 年国防科技大学李霄^[7]也利用 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 实现 9.5 W 的稳定锁模激光输出, 脉宽 26.4 ps. 国内的相关报道中, Nd : YVO₄ 连续锁模的激光器直接振荡级输出功率一般较低. 2007 年蔡志强^[8]利用侧面泵浦 Nd : YVO₄ 晶体, 在不同腔型下实现 5 W 级单路及双路锁模输出; 2008 年, 刘士华^[9]利用 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 激光器, 在泵浦功率 7.5 W 时得到 2.45 W 的输出, 光-光转换效率 32.7%; 2015 年, 黄玉涛^[9]用 SESAM 作为锁模器件, 通过端面泵浦 Nd : YVO₄ 晶体实现了振荡级 5.1 W, 脉宽 23.7 ps 的激光输出, 经后级放大后获得 44 W 的高功率输出.

本文采用 ABCD 传输矩阵理论并利用 Matlab 模拟设计出具有良好热稳定性和超大稳区的 X-型五镜折叠谐振腔. 以 Nd : YVO₄ 作为增益介质, SESAM 作为锁模器件, 在泵浦功率 30 W 时获得 1 064 nm 重复频率为 108.28 MHz、信噪比 44 dB、脉宽为 9.53 ps 的亚 10 ps 量级锁模脉冲输出, 最大输出功率 9.1 W, 对应最大单脉冲能量 84.04 nJ, 光谱宽度 0.29 nm, 激光器的光光转化效率为 30.3%, 斜效率达到 31.7%. 以此为种子源放大可直接获得百瓦级高功率激光输出.

1 腔型设计和理论模拟

1.1 简介

典型的全固态锁模腔型主要有 X-型、Z-型和 W-型^[10]. 在实验中我们采用 X-型腔. X-型腔的特点是

① 收稿日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61378024); 陕西省自然科学基金项目 (2017JM6091) 资助

通讯作者: 王勇刚, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 新型激光材料, E-mail: chinauygqxjw@snnu.edu.cn.

有良好的热稳定性且增益介质处的基模光斑小,有利于降低锁模阈值和提升非线性效应。

锁模激光器谐振腔的设计主要考虑的因素有:SESAM 以及增益介质中基模光斑的大小,激光谐振腔的稳区大小以及谐振腔参数的热稳定性. 这些参数直接影响输出锁模光的质量和激光器的运转稳定性。

实验中腔型设计我们采用 ABCD 矩阵原理,利用 Matlab 软件进行了大量模拟计算,最终设计出符合要求的谐振腔参数并成功搭建光路实现高功率稳定锁模运转。

1.2 谐振腔设计

设整个谐振腔的往返传输矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (1)$$

则腔内基模光斑的束腰大小由(2)式给出^[1]

$$\frac{\pi\omega^2}{\lambda} = \frac{|B|}{\sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2}}. \quad (2)$$

设腔内 SESAM 上子午光束和弧矢光束的光斑大小分别为 ω_t 和 ω_s ,为了降低像散,要求子午光束和弧矢光束的光斑大小尽量接近. 引入以下二维正态分布函数(3)式来表征子午光束和弧矢光束的光斑大小的相近性以及期望光斑大小的符合程度

$$k = \exp\left\{-0.5 \times \left[\frac{(\omega_t - \omega)^2}{0.011^2} + \frac{(\omega_s - \omega)^2}{0.011^2}\right]\right\}, \quad (3)$$

其中二维随机变量为 ω_t 和 ω_s ,分别表示谐振腔内子午光束光斑大小和弧矢光束的光斑大小,且为 ω_t 和 ω_s 相互独立. ω 为此二维正态分布函数的边缘分布的期望,也即是期望的光斑大小. 根据正态分布函数的性质,当 ω_t 和 ω_s 越接近期望 ω 时,函数取值越大. 因而可以用 k 值来表征腔内实际光斑大小和期望的光斑大小 ω 的符合程度, k 的取值范围为 0-1,越接近 1 表明符合程度越好. 其中标准差参数 $\sigma=0.011$ 是一个经过大量试验后确定的一个经验参数。

通过以上方法最终我们设计的具有良好热稳定性和大稳区的谐振腔如图 1 所示,采用 X-型 5 腔镜折叠腔. 其中 M1 为 SESAM,经导热胶粘结在散热铜块上,并借助半导体制冷片对其进行良好的冷却以提高 SESAM 的工作稳定性. 实验所用 SESAM 为德国 BATOP 公司生产,调制深度 $\Delta R=0.5\%$,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^2 ,饱和通量为 $90 \mu\text{J/cm}^2$;M2 和 M3 为曲率半径 $R=100$ 的 1064 nm 高反镜;M4 为曲率半径 $R=100$ 且凹面镀 1064 nm 高反射膜的泵浦镜;为了获得高功率输出,输出镜 M5 为 10% 的输出镜. 各个腔镜之间的距离 $L1, L2, L3, L4$ 分别为 $53 \text{ mm}, 930 \text{ mm}, 113 \text{ mm}, 290 \text{ mm}$. 同时,为减小像散,折叠镜的折叠角度要求尽量小,实验三个折叠角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的大小分别为 $22^\circ, 9^\circ, 12^\circ$. 图 2 为模拟的腔内基模光斑的分布曲线,可以看出在 SESAM 位置有一个很小的聚焦点。

实验所用泵浦源(PUMP)为北京凯普林光电的 30 W LD 泵浦源,采用光纤耦合输出,光纤纤芯直径为 $100 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.22$ 输出波长为 808 nm ,经准直聚焦镜(大恒光电,耦合比 $1:0.8$)聚焦到 Nd:YVO₄ 增益介质上,增益晶体采用福晶科技的 Nd:YVO₄ 激光晶体,掺杂浓度为 0.7% ,体积为 3 mm

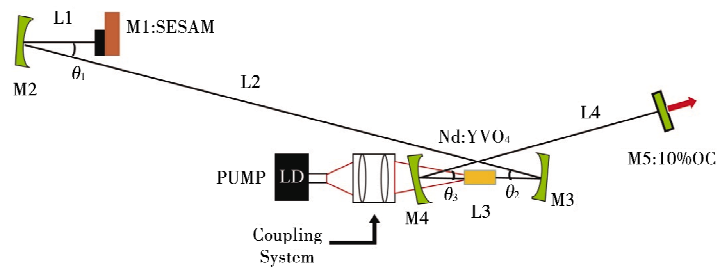


图 1 固体 SESAM 锁模 Nd:YVO₄ 激光器腔型结构图

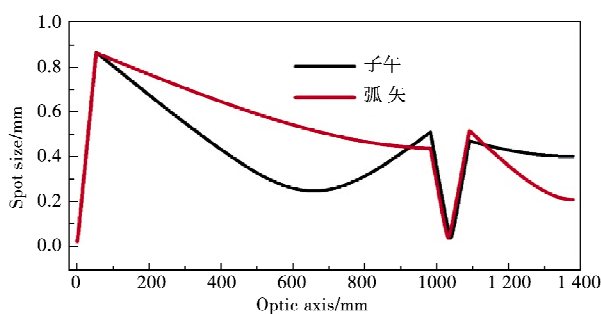


图 2 激光器腔内光斑分布曲线

×3 mm×10 mm, 双面镀 808/1 064 nm 增透膜, 晶体用铝箔包裹后涂敷导热硅脂后固定在水冷铜块上.

图 3 为在进行了一些前期运算的基础上, 设置 L2 和 L4 的长度分别为 930 mm 和 290 mm 的条件下, 利用公式(3)计算的谐振腔稳区模拟结果, 模拟中设置 SESAM 上子午方向和弧矢方向的光斑直径大小的期望值 ω 为 24 μm . 从模拟结果可以看出此谐振腔的 L1 和 L3 两臂在一个较大且连续的区域内有稳区(非蓝色区域)且稳区内腔内光场参数稳定(红色区域), 即使 L1 和 L3 在较大范围内变化也不会引起激光器腔内光场参数的显著变化. 这一优点一方面保证了激光器的运转稳定性, 另一方面也降低了激光器的搭建难度, 简单的调节立刻能让谐振腔实现连续锁模运转.

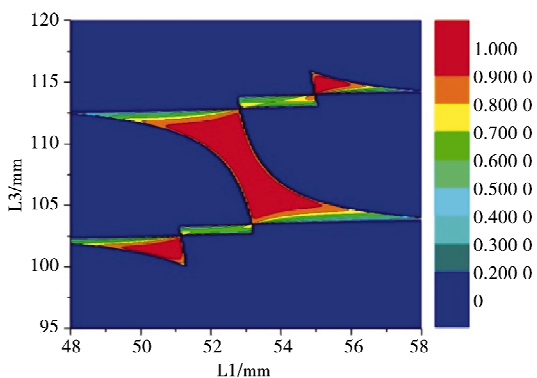


图 3 激光腔稳区范围模拟结果

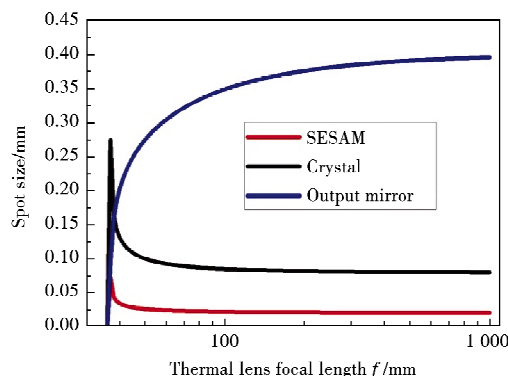


图 4 腔内 SESAM, 晶体以及输出镜位置光斑随热透镜焦距 f 变化趋势

谐振腔的热稳定性也是腔质量的重要判别标准, 因此我们也模拟了腔内光场模式随晶体热透镜效应等效焦距的变化情况, 选取了 SESAM 表面, 晶体中腔内光腰位置, 以及输出镜三个位置的子午光斑变化作为判断依据, 模拟结果如图 4 所示. 可以看出 X-型腔具有很好的热稳定性, 只有当热透镜焦距 f 小于 60 mm 以下时, 才会对腔内光场分布造成明显影响.

实验过程中由于泵浦光的光斑最小直径在 100 μm 左右, 而 M3 和 M4 中间的最小基模光斑半径在 40 μm 左右, 为了充分利用泵浦光获得高功率激光输出, 晶体的实际位置在靠近泵浦源一侧, 偏离 M3 和 M4 的中间 10 mm 处. 此位置处晶体中间的基模光斑半径为 80 μm . 定义抽运系数 $K = \omega_p / \omega_c$, 其中 ω_p 和 ω_c 分别为泵浦光和腔内基模激光的束腰半径, 则此时的抽运系数为 $K = 0.625$.

2 实验结果

通过仔细调节腔镜使激光器运转并实现稳定锁模. 实验中用光电探测器 (DET10 Thorlabs, Inc.) 接收激光脉冲信号, 并分别连接至数字示波器 (RTE1104, Rohde & Schwarz, Inc.)、频谱仪 (FSL SPECTRUM ANALYZER, Rohde & Schwarz, Inc.) 和光谱仪 (AQ6370D, YOKOGAWA, Inc.). 激光器的输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 5(a) 所示: 激光器的出光阈值为 1.3 W, 当泵浦功率增加到 2.2 W 时, 激光器实现调 Q 锁模运转, 2 μs 和 400 ns 分辨率下的调 Q 锁模波形如图 5(c) 所示, 此时输出功率 318 mW, 继续增加泵浦功率到 3.5 W 时, 激光器实现稳定锁模运转, 此时输出功率 858 mW, 最终在泵浦功率达 30 W 时实现了 9.1 W 的高功率连续锁模输出, 对应的最大单脉冲能量达 84.04 nJ. 输出功率与泵浦功率基本呈线性关系, 激光器的光光转化效率为 30.3%, 斜效率达到 31.7%. 图 5(d) 为泵浦功率 18 W 时 500 μs 和 20 ns 示波器显示尺度下连续锁模的波形图, 可以看出激光器锁模运转良好, 没有出现调 Q 锁模现象.

图 5(b) 为泵浦功率 18 W 时输出激光的频谱图, 中心频率为 108.28 MHz, 与激光器的腔长 1 450 mm 相匹配, 信噪比达 44 dB. 图 5(e) 为泵浦功率 18 W 时输出激光的光谱图, 可以看出输出激光中心波长为 1 064.32 nm, 光谱半高全宽 0.29 nm. 利用自相关仪 (PLUSE CHECK, APE, Inc.) 测量泵浦功率 18 W 时输出激光的脉冲宽度, 结果如图 5(f) 所示, 以高斯型曲线进行拟合, 测得脉冲宽度为 9.53 ps, 脉冲的时间带宽积为 0.732, 是理论极限值的 1.66 倍. 这主要是因为晶体引入的正群速度色散导致脉冲展宽.

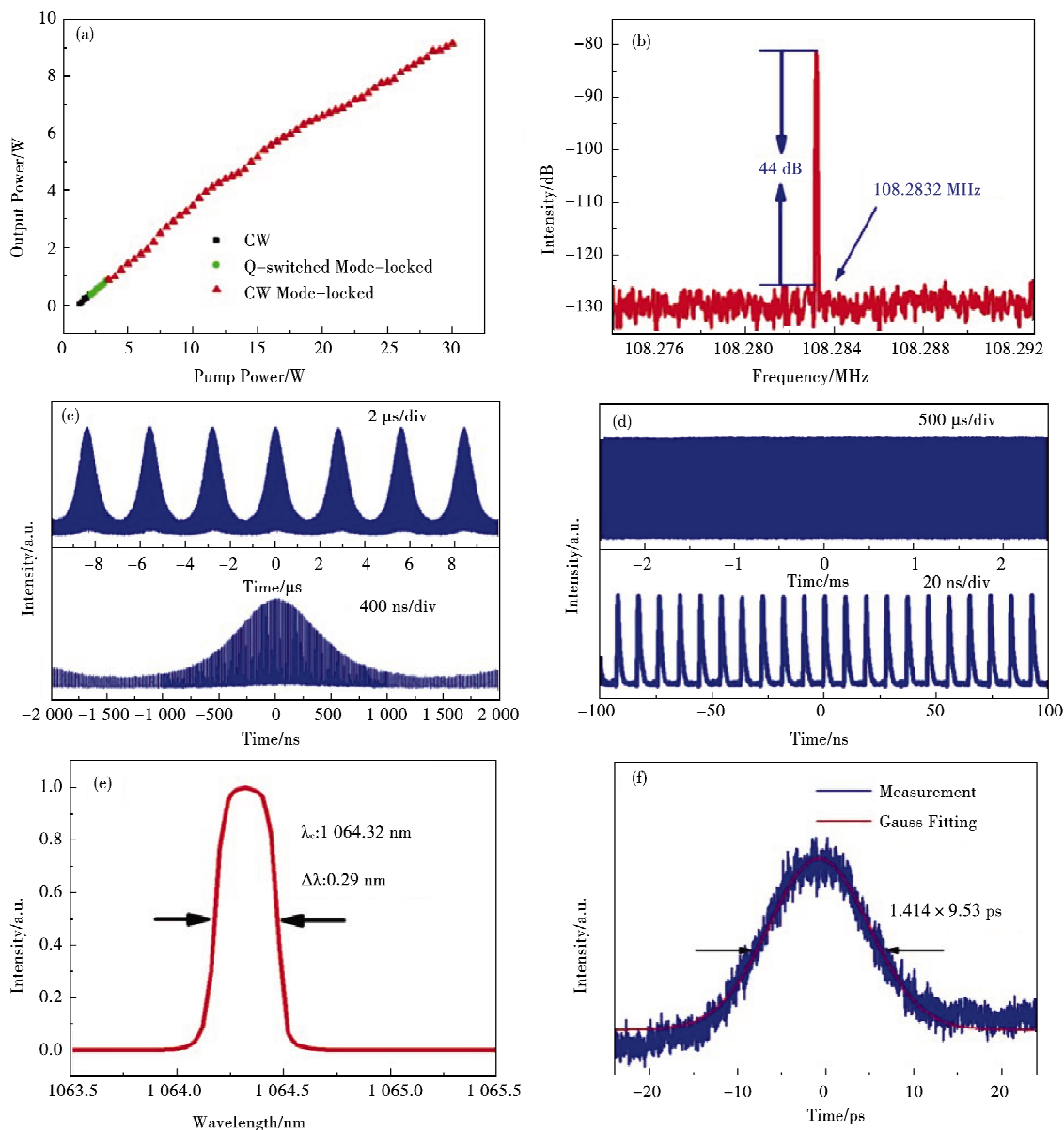


图5 锁模激光器特征描述

(a)输出功率随泵浦功率变化曲线;(b)频谱图;(c)2 μs 和400 ns分辨率下的调Q锁模波形图;
(d)500 μs 和20 ns分辨率下连续锁模波形图;(e)光谱图;(f)脉冲强度自相关曲线

3 结论

利用 ABCD 传输矩阵理论和 Matlab 设计了具有良好热稳定性和超大稳区的 X-型五镜折叠谐振腔,并利用 SESAM 作为锁模元件实现 9 W 量级 1 064 nm 高功率 Nd:YVO₄ 固体锁模激光输出,信噪比达 44 dB,脉冲重复频率为 108.28 MHz,脉冲宽度 9.53 ps,光谱宽度 0.29 nm,激光器的光光转化效率为 30.3%,斜效率达到 31.7%。

参 考 文 献

- [1] 杜鹃. 全固态 SESAM 连续波 1 064 nm 被动锁模激光器的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2004.
- [2] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 505-507.
- [3] 刘士华, 王广刚, 王春慧, 等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/SESAM 锁模激光器实验研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 32-34.

(下转第 47 页)

mun, 2015, 356: 416-420.

- [25] Yang J H, Guo C Y, Ruan S C, et al. Observation of dissipative soliton resonance in a Net-normal dispersion figure-of-eight fiber laser [J]. IEEE Photonics J, 2013, 5(3): 1500806.
- [26] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Nanosecond square pulse generation in fiber lasers with normal dispersion[J]. Opt Commun, 2007, 272: 431-434.

Dissipative Soliton Resonance Pulses in a Net-normal Dispersion Er-doped Fiber Laser

ZHANG Li-qiang GAO Cong-cong WANG Bei-bei ZHANG Bing-yuan

(School of Physics Science and Information Technology, Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Licao Cheng 252059, China)

Abstract The generation of dissipative soliton resonance pulses in a passively mode-locked net-normal dispersion Er-doped fiber laser is demonstrated. The dependence of pulse characteristics on pump power and the state of polarization controllers is investigated detailed. The central wavelength is 1 557 nm, with the 3 dB bandwidth of 6.66 nm. By purely increasing the pump power from 220 mW to 554 mW, the pulse duration extends from 0.78 ns to 3.16 ns, while the pulse energy ranges from 3.5 nJ to 16.9 nJ. At the pump power of 409 mW, by carefully adjusting of the polarization controller's orientation, pulse duration varies from 1.6 ns to 3.2 ns. Moreover, the chirp properties of the pulses is checked. No obvious change on the pulse profile was observed after propagation in a 25 m standard single mode communication fiber.

Key words dissipative soliton resonance; mode lock; normal dispersion; fiber laser

(上接第 30 页)

- [4] 李立卫, 王加贤, 王娟娟. SESAM 实现 Nd:YAG 激光器被动锁模研究及皮秒脉冲测量[J]. 量子光学学报, 2008, 14(2): 213-217.
- [5] Eshghi M J, Majdabadi A, Koochian A. Low threshold diode-pumped picosecond mode-locked Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Laser Physics, 2017, 27: 015002.
- [6] Spühler G J, Paschotta R, Keller U, et al. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10 W average power in a diffraction-limited beam [J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 528.
- [7] 李霄, 王勇刚, 张世强, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3103-3107.
- [8] 蔡志强, 王鹏, 温午麒, 等. 端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 901-907.
- [9] 黄玉涛, 王璐璐, 石朝辉, 等. SESAM 无损伤运转的大功率高重复频率皮秒激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 08020101-08020107.
- [10] 侯佳. 几种新型全固态锁模激光器件的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [11] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

9 Watt Level High-Power Mode-Locked Nd:YVO₄ Laser with SESAM

YANG Xi-guang WANG Yong-gang WANG Jiang WANG Tai-jin CHEN Zhen-dong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract High-Power and high efficiency diode end-pumped passively solid-state mode locked Nd:YVO₄ laser with excellent thermal stability and super huge stable region has been demonstrated by using a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). The X-type laser resonator is designed by using the ABCD transmission matrix theory and is simulated by MATLAB software. A 9.1 W stable mode-locked laser output with repetition rate of 108.28 MHz and pulse duration of 9.53 ps are obtained when the pump power reached 30 W. The corresponding single pulse energy is 84.04 nJ, The optical conversion efficiency and slope efficiency of the laser maser is 30.3% and 31.7%, respectively. and it could be used as a seed laser for a larger oscillator to acquire energy of the order of hundreds watt laser output.

Key words LD Pump; Nd:YVO₄ laser; SESAM; passive mode locked; picosecond pulses