

自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 锁模激光器的研究

张丙元^{1,2} 王国菊² 何京良^{1*} 王文军² 高学喜² 刘云龙²

(¹ 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

(² 聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要 设计了一种简单有效的折叠腔,采用具有部分透过率的平面反射镜作为谐振腔的腔镜,实现了激光的单路输出,提高了激光器输出的利用率,增强了激光器的实用性。利用计算机编程分析了谐振腔内元件的参数对腔内光斑分布的影响。利用自聚焦透镜对激光二极管(LD)进行整形,实现了端面抽运 Nd:YVO₄ 半导体可饱和吸收镜(SESAM)连续波锁模稳定运转。在抽运功率为 3 W 时,获得了平均功率为 800 mW,脉冲宽度为 5.2 ps 的锁模脉冲,光-光转换效率为 27%。

关键词 激光技术;LD 抽运;自聚焦透镜;半导体可饱和吸收镜;被动锁模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0714001

Passively Mode Locking of Nd:YVO₄ Laser with Grin Lens as Optical Coupler

Zhang Bingyuan^{1,2} Wang Guoju² He Jingliang¹ Wang Wenjun²

Gao Xuexi² Liu Yunlong²

(¹ State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

(² College of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University,

Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract With a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), a simple folded cavity has been designed to achieve mode-locking with a single output. The plane mirror is employed as a cavity mirror as well as an output coupler. The grin lens is employed as the optical coupler to shape the single diode laser, the stable continuous wave mode locking is achieved with the pulse width of 5.2 ps and the repetition rate of 100 MHz. The average output power is 800 mW with the pump power of 3 W, and the optical-optical conversion efficiency is 27%. The characteristics of the laser cavity are analyzed by computer.

Key words laser technique; laser diode pumping; grin lens; semiconductor saturable absorber mirror; passively mode-locking

OCIS codes 140.4050; 140.3480; 140.3530; 140.3070

1 引 言

1992 年 U. Keller 等^[1]成功研制出半导体可饱和吸收镜(SESAM)并应用于锁模激光器。此后,人们开始从不同角度研究 SESAM 锁模^[2~12]。由于 SESAM 锁模激光器具有结构简单、光束质量高和

稳定性高等特点,而被广泛应用于工业、医疗、材料加工、科学研究、非线性频率变换和再生放大等方面^[13~15]。通常情况下由锁模激光器直接产生的锁模脉冲重复频率较高,单脉冲能量较低,从而限制了在一些领域的应用。为了获得高能量的超短脉冲,

收稿日期: 2011-01-06; **收到修改稿日期**: 2011-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(60878012, 11074148, 10874063)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2009DX014)、山东省科技攻关计划(2010GGX10127)和山东省高等学校科技计划项目(J10LA60)资助课题。

作者简介: 张丙元(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事全固态激光器、激光超短脉冲的产生及放大技术等方面的研究。

E-mail: jlhe@sdu.edu.cn

需要对激光脉冲进行放大。然而要获得性能稳定的高能量激光脉冲,稳定的锁模激光脉冲种子源是非常重要的部分。因此研究结构紧凑、实用性强以及性能稳定的小功率皮秒振荡源成为一个非常重要的方向。本文采用性能稳定成本低的 Nd:YVO₄ 作为增益介质,利用自聚焦透镜对激光二极管抽运光进行整形;具有部分透过率的平面反射镜作为谐振腔的腔镜和输出镜;采用折叠腔,实现了端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器 SESAM 稳定连续波锁模运转。

2 实验设计与谐振腔特性分析

图 1 为激光二极管(LD)端抽运 Nd:YVO₄ 锁模实验装置示意图。LD 最大功率为 3 W,利用自聚焦透镜($\phi 3\text{ mm}\times 9\text{ mm}$)直接将光耦合进激光晶体。所用晶体 Nd:YVO₄ 的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,晶体的前端面镀对 1064 nm 的全反膜和 808 nm 的增透膜,后端面镀 1064 nm 的增透膜。谐振腔内的振荡光与激光晶体端面法线方向有个一小角度夹角,这样很好地避免了标准具效应,晶体端面无需切割成小角度。M₂ 和 M₃ 为镀 1064 nm 全反膜的凹面镜,M₁ 为镀对 1064 nm 部分透过的平面全反镜,耦合输出镜 M₁

的透过率为 5%,单方向输出。SESAM 反射率为 99%,可饱和吸收系数为 5%,饱和通量为 $70\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

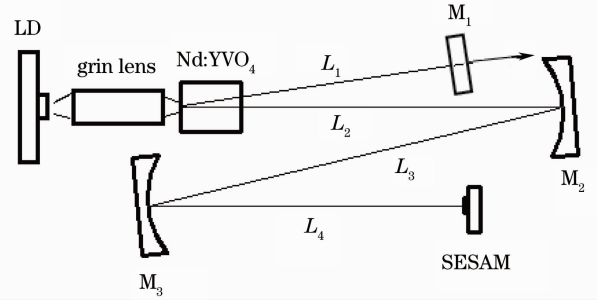


图 1 LD 端抽运 Nd:YVO₄ 锁模激光器

Fig. 1 Schematic of diode-end-pumped mode-locked Nd:YVO₄ laser

由于 SESAM 连续波锁模阈值和稳定性与入射到 SESAM 上的功率密度有关,即与腔内功率和 SESAM 上的光斑大小有关,利用数值方法分析了各腔参数对谐振腔的稳区范围和 SESAM 上光斑大小的影响。 l 为晶体的长度, f 为晶体的热焦距, L_1, L_2, L_3, L_4 分别代表图中所示器件之间的距离, θ 为凹面镜、晶体入射面与光轴的夹角, r_2, r_3 为凹面镜 M₂ 和 M₃ 的曲率半径。以 SESAM 为参考面写出谐振腔内子午面和弧矢面上光束传输的往返矩阵

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_3 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_3 \cos \theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{r_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n \frac{l}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 \cos \theta}{r_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

谐振腔的稳定性条件为

$$|(A + D)/2| \leq 1. \quad (3)$$

根据谐振腔的稳定性条件,求出谐振腔的稳区、谐振腔内的光斑分布以及 SESAM 上的光斑半径

$\omega_i (i=t, s)$;

$$\omega_i^2 = \frac{\lambda |B_i|}{\pi \sqrt{1 - [(A_i + D_i)/2]^2}}. \quad (4)$$

用计算机处理有关数据,分析各腔参数对谐振腔的稳区范围及 SESAM 上子午面光斑半径(ω_t)和弧矢面光斑半径(ω_s)的影响。计算过程中, $L_1 + L_2 = L_4 = r_2/2 = r_3/2 = 200$ mm,晶体长度 $l = 5$ mm,热焦距 $f = 342$ mm, $L_3 = 1095$ mm。

图 2 是 $\theta = 5^\circ$ 时谐振腔内子午面和弧矢面上各处光斑分布。从图 2 可以看出,当 $\theta = 5^\circ$ 时子午面光斑半径(ω_t)和弧矢面光斑半径(ω_s)在 SESAM 上几乎是重合的,这样能保证稳定的锁模运转。在实验过程中未采取专门的像散补偿措施,为了减小像散, $\theta < 5^\circ$ 。

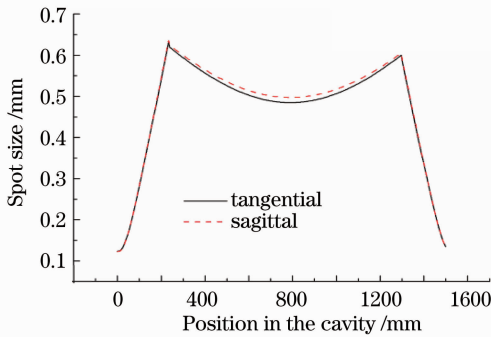


图 2 谐振腔内子午面和弧矢面各处光斑分布($\theta = 5^\circ$)

Fig. 2 Spot size on the tangential and sagittal plane in cavity ($\theta = 5^\circ$)

取凹面镜 M_2 和 M_3 及晶体与光轴的夹角 $\theta = 5^\circ$,分析了谐振腔参数对 SESAM 上的光斑分布的影响。图 3 是 SESAM 上子午面光斑半径(ω_t)和弧矢面光斑半径(ω_s)随 M_2 和 M_3 的间距(L_3)的变化曲线。从图 3 看出,当 L_3 在 $800 \sim 1200$ mm 变化时,SESAM 上的光斑变化是比较缓慢的,也就是说

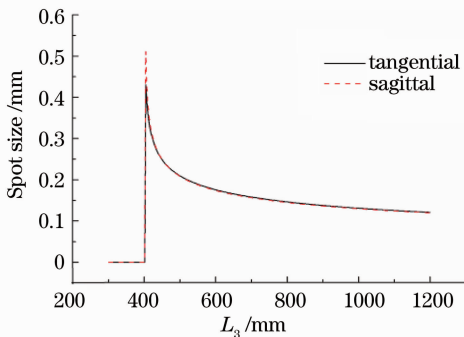


图 3 SESAM 上子午面和弧矢面光斑半径随 M_2 和 M_3 的间距 L_3 的变化曲线

Fig. 3 Spot size on meridian and sagittal plane of SESAM changing with the distance L_3 between M_2 and M_3

在实验过程中 L_3 的值对锁模状态影响比较小。实验过程中可以通过增加 L_3 的长度,降低光脉冲的重复频率。

图 4 和图 5 分别是 SESAM 上子午面光斑半径(ω_t)和弧矢面光斑半径(ω_s)随 $L_1 + L_2$ 和 L_4 的变化曲线。从图 4 和图 5 看出,理论上 $L_1 + L_2$ 和 L_4 可以在 $170 \sim 260$ mm 的范围内取值,但只有当 $L_1 + L_2, L_4$ 在 $r_1/2$ 和 $r_2/2$ 附近取值时,子午面光斑半径(ω_t)和弧矢面光斑半径(ω_s)在 SESAM 上几乎是重合的,也就是说入射到 SESAM 上的光斑模式较好,这样能保证稳定的连续锁模运转。从图 4 和图 5 还可以看出 $L_1 + L_2$ 和 L_4 的变化对 SESAM 上光斑的变化影响比较大,实验过程中要仔细调节。并且, $L_1 + L_2$ 和 L_4 的最佳值不是在凹面镜的焦点处,而是比 $r/2$ 要略大一些,此时才能保证 SESAM 上的光斑模式比较好,易于实现连续锁模运转。

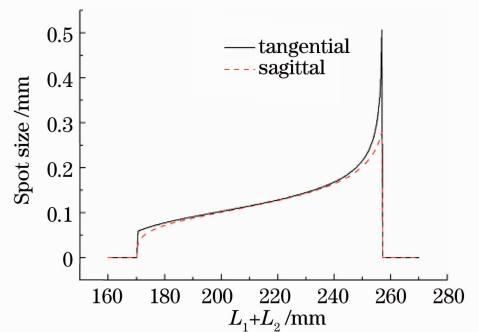


图 4 SESAM 上子午面和弧矢面光斑半径随 $L_1 + L_2$ 的变化曲线

Fig. 4 Spot size meridian and sagittal plane on SESAM changing with $L_1 + L_2$

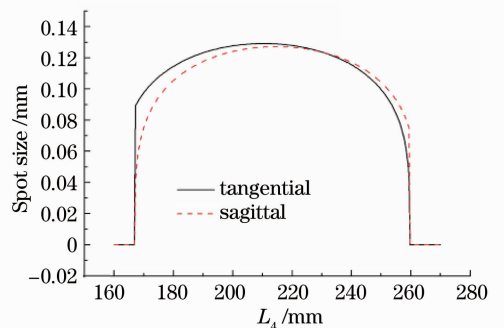


图 5 SESAM 上子午面和弧矢面光斑半径随 L_4 的变化曲线

Fig. 5 Spot size meridian and sagittal plane on SESAM changing with L_4

3 实验结果分析讨论

实验过程中,仔细调节谐振腔,逐渐增加抽运功

率,用光电二极管、示波器和功率计监测激光器的输出波形和输出功率。当抽运功率为 0.6 W 时,激光器连续波(CW)运转,当抽运功率为 1 W 时,激光器调 Q 锁模(QML)运转,调 Q 锁模波形如图 6 所示。

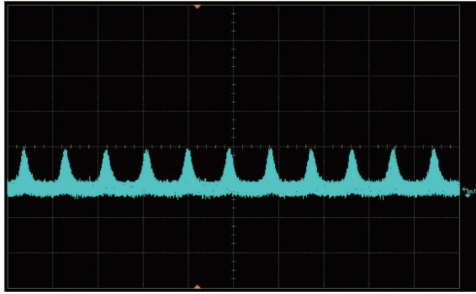


图 6 用光电二极管和示波器观察到的调 Q 锁模波形
Fig. 6 Q-switched mode-locked pulses waveform by photodiode and oscilloscope

当抽运功率为 1.4 W 时,激光器连续波锁模(CWML)运转,锁模波形序列如图 7 所示,此时腔长为 1.5 m,重复频率为 100 MHz。当抽运功率为 3 W 时,获得 800 mW 的连续锁模激光输出,光-光转换效率为 27%。图 8 给出了激光器运转时输出功率和抽运功率的变化曲线。

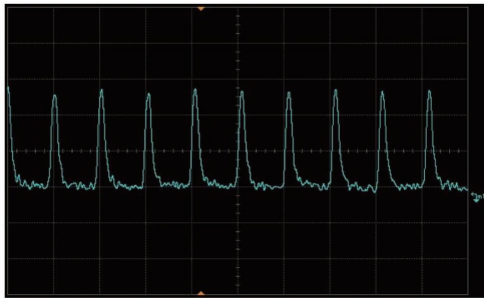


图 7 用光电二极管和示波器观察到的连续波锁模波形序列(10 ns/div)

Fig. 7 CW mode-locked pulses sequence by photodiode and oscilloscope (10 ns/div)

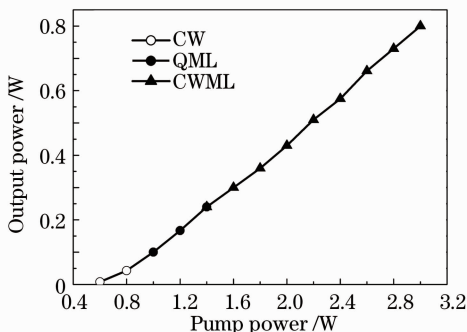


图 8 连续锁模运转时输出功率和抽运功率的关系
Fig. 8 Variation of output power with pump power

利用 FR-103XL 自相关仪进行了锁模脉冲宽度测量,用示波器记录下自相关曲线(见图 9),其半峰全宽为 228 μ s。锁模脉冲宽度 $\tau = \Delta t \alpha 32$ ps/ms, α 是波形系数,按高斯函数确定,即 $\alpha = 0.707$ 。根据上述公式计算得,锁模脉宽 $\tau = 5.2$ ps。

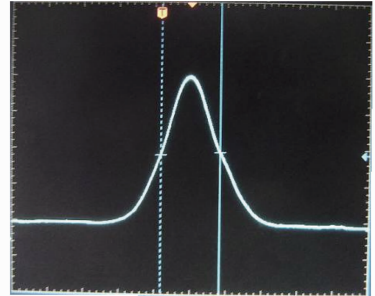


图 9 非共线二次谐波自相关仪测量的自相关曲线
Fig. 9 Autocorrelation of CW mode-locked laser by noncollinear SHG autocorrelator

利用光束质量分析仪对锁模激光器的光束质量进行了测量,从图 10(a),(b)可以看出,锁模脉冲的光斑为近似对称的圆形,光斑的能量分布呈高斯分布,在 x, y 轴与标准高斯曲线符合系数分别为 0.985 和 0.988。利用光束质量分析仪测量得光束的发散角为 $\theta = 0.32$ mrad, $M^2 = 1.25$ 。

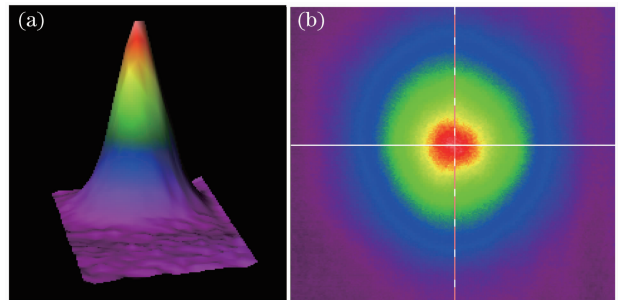


图 10 锁模激光振荡器输出光斑能量分布图。

(a) 三维, (b) 二维

Fig. 10 Far field beam profile of the CW mode-locked laser. (a) 3D, (b) 2D

4 结 论

利用计算机编程分析了谐振腔内元件的参数对腔内光斑分布的影响。采用折叠腔,利用自聚焦透镜对激光二极管抽运光进行整形,实现了稳定的端面抽运 Nd:YVO₄ SESAM 连续波锁模运转,用具有部分透射率的平面反射镜作为谐振腔的腔镜,实现了激光的单路输出,提高了激光器输出的利用率。在抽运功率为 3 W 的情况下,获得了平均功率为 800 mW,脉冲宽度为 5.2 ps 的锁模脉冲,光-光转换效率为 27%。

参 考 文 献

- 1 U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7): 505~507
- 2 G. J. Spühler, T. Südmeyer, R. Paschotta *et al.*. Passively mode-locked high power Nd:YAG lasers with multiple laser heads [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**(1): 19~25
- 3 Zhang Bingyuan, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Study on diode side pumped mode locked laser with semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 59~62
张丙元, 陈 檬, 李 港等. 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 59~62
- 4 Cai Zhiqiang, Wang Peng, Wen Wuqi *et al.*. LD end pumped all solid state picosecond passively mode locking lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 901~907
蔡志强, 王 鹏, 温午麒等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 901~907
- 5 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Passive mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1829~1831
- 6 J. L. He, Y. X. Fan, J. Du *et al.*. 4-ps passively mode locked Nd:Gd_{0.5}Y_{0.5}VO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2803~2805
- 7 Zhang Haikun, Xu Jinlong, Huang Haitao *et al.*. Passively CW mode-locked Nd:YAG picosecond laser with a partially reflective semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2400~2403
- 张海鸥, 徐金龙, 黄海涛等. 透射式 SESAM 实现 Nd:YAG 连续波锁模皮秒脉冲激光 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2400~2403
- 8 Li Xiao, Wang Yongang, Zhang Shiqiang *et al.*. Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG laser with SESAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3103~3107
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
- 9 Sanjun Zhang, E. Wu, Haifeng Pan *et al.*. Passive mode-locking in a diode pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(5): 505~508
- 10 U. Keller. Ultrafast all-solid-state laser technology [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**: 347~363
- 11 Steve Lecomte, Markus Kalisch, Lukas Krainer *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ lasers with 40-GHz repetition rate [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, **41**(1): 45~52
- 12 U. Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- 13 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Flash-lamp-pumped picosecond Nd:YAG regenerative amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12): 692~694
- 14 Achim Nebel, Thomas Herrmann, Bernhard Henrich *et al.*. Fast micromachining using picosecond lasers [C]. *SPIE*, 2005, **5706**: 87~90
- 15 Achim Nebel, Thomas Herrmann, Bernhard Henrich *et al.*. Generation of tailored picosecond-pulse-trains for micro-machining [C]. *SPIE*, 2006, **6108**: 610812