

# 20 MHz 紧凑型高功率被动锁模 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

毛小洁 秘国江 庞庆生 邹跃

(华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 报道了谐振腔长达 7.5 m 的紧凑型被动锁模激光器, 通过谐振腔的折叠设计, 整个激光器被压缩为 55 cm 长, 15 cm 宽。采用二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 经半导体可饱和吸收镜被动锁模后激光再一次通过增益晶体放大后输出。在重复频率为 20 MHz 时, 输出激光脉冲宽度为 14.2 ps, 最大输出功率 6.14 W, 输出激光为 1064 nm 的基横模(TEM<sub>00</sub>); 单脉冲能量达 0.3 μJ。较长的谐振腔保证了良好的光束质量, 光束质量因子  $M^2$  在 X 方向为 1.17, Y 方向为 1.06, 功率不稳定性为 0.5%。

**关键词** 激光器; 紧凑型激光器; 被动锁模激光器; 半导体可饱和吸收镜; 二极管端面抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002004

## 20 MHz Compact High Power Passively Mode-Locked Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

Mao Xiaojie Bi Guojiang Pang Qingsheng Zou Yue

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics  
Beijing 100015, China)

**Abstract** A compact passively mode-locked laser with 7.5-m cavity length is reported. The laser is 55 cm in length and 15 cm in width by the resonator folding design. The Nd:YVO<sub>4</sub> crystal is end-pumped by the diode laser. The output laser with double-pass of the gain crystal after passively mode locked by semiconductor saturable absorber is obtained. The repetition rate is 20 MHz and the pulse width is 14.2 ps, the average power is 6.14 W and the output laser is TEM<sub>00</sub> at 1064 nm. The pulse energy is 0.3 μJ. The quality of laser beam  $M^2$  is 1.17 in X direction and 1.06 in Y direction. The power unstability is 0.5%.

**Key words** lasers; compact laser; passively mode locked laser; semiconductor saturable absorber mirror; diode end-pumping

**OCIS codes** 140.3460; 140.3480; 140.4050

## 1 引言

被动锁模固态激光振荡器提供飞秒或皮秒脉冲, 重复频率从几兆赫兹到几百兆赫兹, 功率从几百毫瓦到几十瓦<sup>[1-5]</sup>, 已广泛应用于眼科医疗、远程探测和生物科技等领域<sup>[6-8]</sup>。Spuhler 等<sup>[9]</sup>采用二极管抽运 Nd:YAG 晶体在重复频率为 55 MHz 时用三个抽运头实现功率输出 27 W; Brunner 等<sup>[10]</sup>采用端面抽运 Yb:YAG 薄片, 在重复频率为 57 MHz 时得到 1030 nm 激光输出, 脉冲宽度为 705 fs, 平均功率达 80 W, 单脉冲能量大于 1 μJ, 放大后可用于激光精细冷加工。太阳能板的划线在加工过程中要求单脉冲能量达几十微焦, 同时为了提高加工效率, 重复频率要求达到 2 MHz, 需要输出平均功率大于

40 W。通常采用主振荡功率放大器(MOPA)的方式<sup>[11-13]</sup>, 通过电光单选器<sup>[14]</sup>选出重复频率为 2 MHz 的脉冲后进行功率放大, 电光单选器在 2 MHz 时的上升时间约为 20 ns, 所以要求主振荡器的重复频率约为 20 MHz, 此时锁模对应的谐振腔长为 7.5 m。Herriott 望远镜系统能很好地达到压缩腔长的效果, 同时还能保证光束的稳定传播。但需使两凹面镜的主光轴严格重合, 反射光斑的分布对称于凹面镜中心, 这有一定调试难度。激光束的截面和发散角与反射次数也有很大关系, 结构设计难度较大, 而且需在一个凹面镜上开一入射孔, 不太利于实现工程化, 且成本较高。而采用多镜折叠结构, 光斑都在凹面镜的中心反射, 引起的光斑畸变较

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-05-09

作者简介: 毛小洁(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高功率锁模激光器及高重频皮秒放大技术方面的研究。

E-mail: maoxiaojie991220@163.com

小,结构简单。目前提高皮秒振荡器输出功率、输出功率稳定性和折叠谐振腔的紧凑性已成为需解决的迫切问题。

本文对谐振腔单模输出进行分析并利用 MatrixLaser 软件进行模拟,采用多次折叠的方法,把整个激光器压缩在 55 cm×15 cm 的底板上。采用二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)进行被动锁模,在 24 W (808 nm)的抽运功率下,输出重复频率为 20 MHz,脉冲宽度为 14.2 ps,平均功率为 6.14 W 的基横模(TEM<sub>00</sub>) 1064 nm激光;结构采用的较长的谐振腔保证了良好的光束质量,使光束质量因子在 X 方向达到 1.17,Y 方向达到 1.06。功率不稳定性为 0.5%,为下一步的功率放大提供了可靠的高功率种子源。

## 2 谐振腔设计

重复频率为 20 MHz 时对应锁模谐振腔腔长为 7.5 m,需要考虑谐振腔的稳定性和光路的紧凑性;输出高功率 TEM<sub>00</sub> 模激光,需要考虑抽运光和振荡光的模式匹配和增益介质的热焦距问题;实现高功率锁模和抑制调 Q 锁模,需要考虑振荡光在 SESAM 上的光斑大小。

### 2.1 TEM<sub>00</sub> 模输出设计

对于高功率抽运而言,抽运光光斑直径  $\omega_p$  和振荡光光斑直径  $\omega_o$  的比值大小对输出光束质量有很大的影响。增益介质的温度梯度导致热应力的增加,抽运区域波前畸变明显,为了提高光束输出质量,抽运光的光斑直径必须大于振荡光的光斑直径以抑制畸变。但  $\omega_p$  的大小必须适当,如果  $\omega_p$  比  $\omega_o$  大很多,高阶模就会得到足够的增益而起振,使得输出光是 TEM<sub>00</sub> 模和高阶模的混合光甚至是高阶模。采用光纤耦合抽运,抽运光斑是圆形对称的,模式可以用拉格朗日-高斯模式 TEM<sub>0n</sub> 模表示。因为抽运光高阶模在光纤中大的传输损耗, $n > 1$  的高阶模式被损耗掉,所以  $n = 1$ 。拉格朗日-高斯模的模直径在 TEM<sub>00</sub> 模直径和 TEM<sub>0m</sub> 模直径之间,即

$$\frac{\omega_{\text{TEM}_{00}}}{\omega_{\text{TEM}_{0m}}} = \frac{1}{\sqrt{m + 2n + 1}} \quad (1)$$

由(1)式可得到

$$\omega_{\text{TEM}_{01}} \approx 1.73\omega_{\text{TEM}_{00}} \quad (2)$$

为了输出 TEM<sub>00</sub> 模式,抽运光光斑直径  $\omega_p$  和振荡光光斑直径  $\omega_o$  的比例关系为

$$1 < \omega_o / \omega_p < 1.73 \quad (3)$$

实验所用光纤直径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22,设

计谐振腔时,振荡光斑直径应大于 400  $\mu\text{m}$  且小于 692  $\mu\text{m}$ ,但是为了提高输出功率,选定振荡光斑直径应接近 400  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 连续锁模设计

实现稳定连续锁模所需要的最小腔内脉冲能量<sup>[15]</sup>为

$$E_{P,C} = (E_{\text{Sat,L}} E_{\text{Sat,A}} \Delta R)^{1/2} = (F_{\text{Sat,L}} A_{O,L} F_{\text{Sat,A}} A_{A,A} \Delta R)^{1/2} \quad (4)$$

式中  $\Delta R$  为 SESAM 的调制深度,腔内脉冲能量  $E_P = PT_R$ ,  $T_R$  为脉冲周期,  $P$  为腔内功率,  $E_{\text{Sat,L}}$  为增益晶体中的脉冲能量,  $E_{\text{Sat,A}}$  为 SESAM 中的脉冲能量,  $F_{\text{Sat,A}}$  为 SESAM 中的有效饱和通量;  $F_{\text{Sat,L}} = h\nu_L A_o / m\sigma_L$  为增益介质有效饱和通量,其中  $\sigma_L$  为受激发射截面,  $\nu_L$  为晶体出射光频率,  $A_o$ 、 $A_A$  分别是腔模在激光介质和可饱和吸收镜上的光斑面积,  $m$  表示一个周期内激光通过增益介质的次数。半导体可饱和吸收镜的引入使激光器很容易运转在调 Q 锁模阶段,要抑制调 Q 锁模,应满足  $E_P > E_{P,C}$ 。根据(4)式,为了抑制调 Q 锁模,应采用受激发射截面  $\sigma_L$  较大的激光介质 Nd:YVO<sub>4</sub>;谐振腔长为 7.5 m,  $T_R$  较大,腔内脉冲能量  $E_P$  较高,易抑制调 Q 锁模。合理设计激光增益介质和半导体可饱和吸收镜上的光斑直径;一般情况下,应保证  $A_A$  尽可能小,有利于连续锁模,但 SESAM 的损伤阈值为 500 MW/cm<sup>2</sup> 左右,高功率固体锁模 SESAM 的调制深度  $\Delta R$  在 3% 左右,饱和通量为 70  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,增益介质上的光斑直径  $\omega_o$  略大于 400  $\mu\text{m}$ ,若腔内功率 15 W,为了不损伤 SESAM,SESAM 上的光斑直径在 200  $\mu\text{m}$  左右。

### 2.3 谐振腔模拟

二极管端面高功率抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体时,热透镜效应是不容忽视的问题。计算机模拟和采用 He-Ne 激光直接测试晶体在不同抽运功率下的热透镜焦距如图 1 所示。

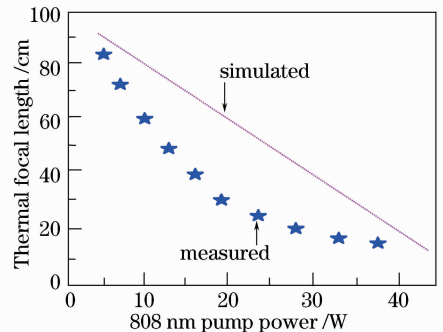


图 1 热透镜焦距随抽运功率的变化

Fig. 1 Thermal focal length versus pump power

利用 MatrixLaser 谐振腔模拟软件对 7.5 m 长谐振腔进行模拟,在 808 nm 处抽运功率为 24 W 时,根据图 1 得到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜焦距为 250 mm,设计的激光谐振腔的稳定性如图 2 所示。图 2 中  $L$  是腔长, $R_1$  和  $R_2$  是输出镜  $M_1$  和 SESAM 的曲率半径, $G_1$ 、 $G_2$  表示谐振腔的  $G$  参数, $A$  和  $D$  分别表示  $ABCD$  传输矩阵中的  $A$  参数和  $D$  参数,激光器的稳定条件为  $(A+D)/2=0.7639$ , $G_1G_2=0.1319$ ,满足激光器谐振腔的稳定性。谐振腔中各镜面处和晶体中的光斑大小如图 3 所示。

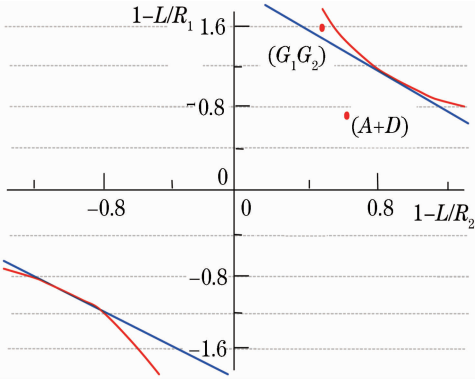


图 2 谐振腔稳定性

Fig. 2 Stability of the resonator

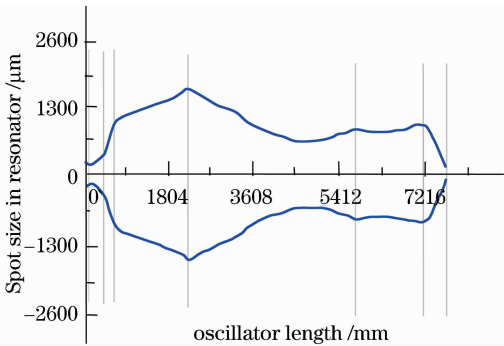


图 3 谐振腔中的光斑大小

Fig. 3 Laser spot size in the resonator

由图 3 得到振荡光在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体上的光斑大小为 420  $\mu\text{m}$ ,抽运光和振荡光匹配良好,满足 TEM<sub>00</sub> 模输出设计。振荡光在 SESAM 上的光斑直径为 198  $\mu\text{m}$ ,满足连续锁模设计。

### 3 实验装置

激光器实验装置如图 4 所示。808 nm 激光二极管抽运源(nLight Laser)通过光纤(芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22)输出 808 nm 激光的最大功率为 40 W。抽运光通过焦距为 150 mm 的两个透镜耦合进 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体(双端对 808 nm 和 1064 nm 激光高透)尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,掺

杂原子数分数为 0.3%。由平平输出镜  $M_1$  (对 808 nm 激光高透)和 SESAM 构成谐振腔。其中,输出镜对 1064 nm 的透射率为 20%;由德国 BATOP 公司生产的 SESAM 对振荡光的吸收率为 4%,调制深度  $\Delta R$  为 3.2%,调制深度较深,有利于连续锁模,其饱和通量为 70  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,损伤阈值在 600  $\text{MW}/\text{cm}^2$ ,满足设计要求。各镜片参数和镜片之间距离如表 1 所示。

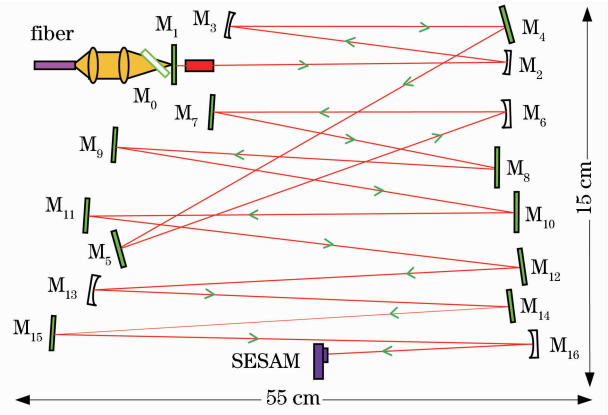


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

表 1 镜片参数和镜片之间距离

Table 1 Mirror parameters and length between mirrors

Mirror	Film	Radius /mm	Length /mm	Angle /( $^\circ$ )
$M_0$	AR, 808 nm & HR, 1064 nm	$\infty$	10	45
$M_1$	AR, 808 nm	$\infty$	333	0
$M_2$	HR, 1064 nm	1500	268	6
$M_3$	HR, 1064 nm	2500	385	6
$M_4$	HR, 1064 nm	$\infty$	548	0
$M_5$	HR, 1064 nm	$\infty$	476	0
$M_6$	HR, 1064 nm	3000	440	6
$M_7$	HR, 1064 nm	$\infty$	485	0
$M_8$	HR, 1064 nm	$\infty$	500	0
$M_9$	HR, 1064 nm	$\infty$	505	0
$M_{10}$	HR, 1064 nm	$\infty$	515	0
$M_{11}$	HR, 1064 nm	$\infty$	525	0
$M_{12}$	HR, 1064 nm	$\infty$	500	0
$M_{13}$	HR, 1064 nm	3500	485	6
$M_{14}$	HR, 1064 nm	$\infty$	505	0
$M_{15}$	HR, 1064 nm	$\infty$	510	0
$M_{16}$	HR, 1064 nm	600	298	0

### 4 实验结果及讨论

当 808 nm 抽运光功率超过 8 W 时,激光器出光。由于谐振腔长达 7.5 m,所以激光器出光阈值

比较高,1064 nm 激光输出功率随 808 nm 抽运功率的变化如图 5 所示。

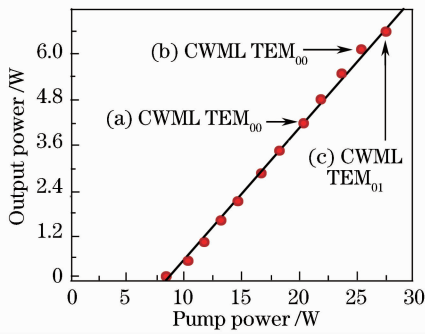


图 5 1064 nm 激光输出功率随 808 nm 抽运功率的变化  
Fig. 5 Output power at 1064 nm versus pump power at 808 nm

随着抽运功率的加大,1064 nm 激光在 SESAM 上的功率密度提高,开始出现调 Q 锁模,当抽运功率为 20.4 W 时,开始连续锁模(CWML)。此时用相干公司生产的功率计探头(EPM1000 型)测得 1064 nm 激光输出功率为 4.2 W,如图 5 中(a)所示;当抽运功率为 25.7 W 时,也是连续锁模,此时 TEM<sub>00</sub> 模 1064 nm 激光的输出功率达 6.14 W,如图 5 中(b)所示,光-光转换效率为 23.8%;进一步加大抽运功率后,虽然仍是 CWML,但光斑模式为 TEM<sub>01</sub> 模,如图 5 中(c)所示,原因是晶体中的振荡光斑直径小于抽运光斑直径。图 5 中(b)状态的输出远场光斑如图 6 所示。

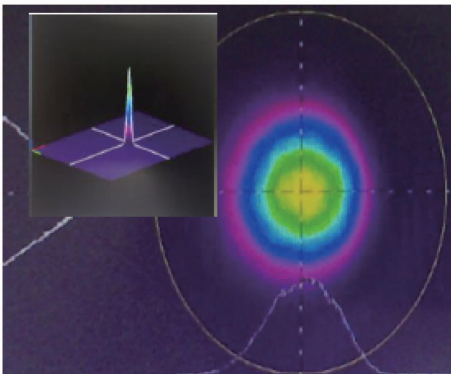


图 6 输出远场光斑  
Fig. 6 Output far-field spot

图 6 中的光斑是对测试光束质量因子时最后一个步长的光斑,此高斯光斑圆度较高。光束质量因子  $M_x^2$  为 1.17,  $M_y^2$  为 1.06,这得益于较长的谐振腔长和对谐振腔的有效设计。用美国力科公司 16G 示波器(型号 Wavemaster816Zi-A)测试的连续锁模脉冲序列波形如图 7 所示。

从图 7 可以看出,当示波器时间轴为 200 ns/div

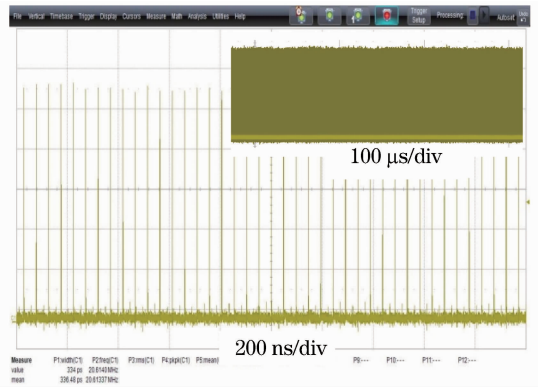


图 7 连续锁模脉冲序列波形图

Fig. 7 Pulse train of the continuous-wave mode-locked laser 和 100 μs/div 时,锁模波形都是连续的,没有间断现象,此时显示重复频率为 20 MHz。在图 7 中,波形不仅连续,也没有上下起伏,锁模状态稳定,输出功率稳定,经过 1 h 的测量,功率不稳定性为 0.5%。

对于超短脉冲激光器,对其脉冲宽度的测量尤为重要,采用德国 APE 公司生产的自相关仪(产品型号:PulseCheck)测试的锁模脉冲宽度如图 8 所示。

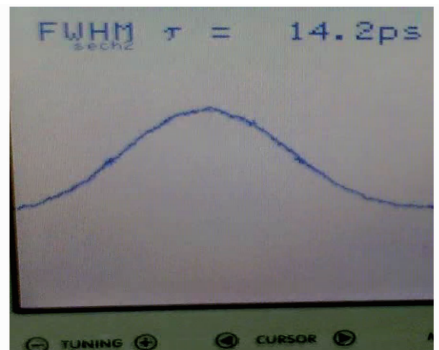


图 8 锁模脉冲宽度

Fig. 8 Pulse width of mode-locked laser

在图 8 中,没有设置波形光滑[半峰全宽(FWHM)下显示 smooth]时的波形也很光滑,说明锁模非常稳定,此时锁模脉冲宽度  $\tau$  为 14.2 ps。激

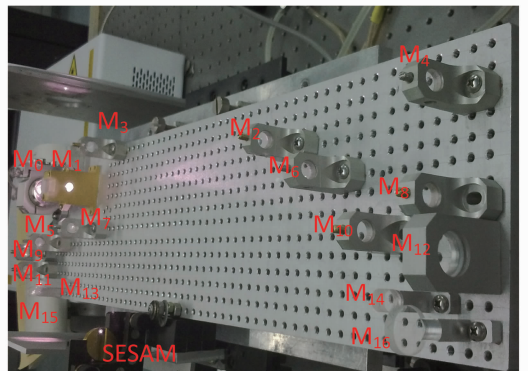


图 9 激光器照片

Fig. 9 Experimental setup of laser

光器实验装置如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,结构非常紧凑,且采用单端输出形式。振荡光从晶体出发,经过折叠镜到达锁模器 SESAM,经 SESAM 调制后,生成连续锁模激光;连续锁模激光经折叠镜后,又一次通过 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,相当于一次功率放大,所以输出功率高。

## 5 结 论

重复频率为 20 MHz 的高功率皮秒激光器既保证了大单脉冲能量和锁模的高稳定性(腔长越长,腔内纵模数越多,锁模越稳定),又保证了系统不会太复杂。谐振腔长虽达 7.5 m,通过谐振腔的紧凑性设计,整个激光器被压缩为 55 cm 长、15 cm 宽的结构,有利于实现工程化。50 ns 的脉冲间隔保证了高重复频率(1~2 MHz)单选(声光或电光单选器)都不会出现多脉冲现象。实验得到重复频率为 20 MHz,脉冲宽度为 14.2 ps 的 TEM<sub>00</sub> 模 1064 nm 激光输出。振荡光经 SESAM 锁模后再一次通过 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,平均输出功率达 6.14 W;较长的谐振腔保证了良好的光束质量,使光束质量因子在 X 方向为 1.17, Y 方向为 1.06,功率不稳定性为 0.5%。为下一步的功率放大提供了稳定可靠的高功率种子源。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0  $\mu\text{m}$ [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902001.  
刘江,王璞. 高功率被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902001.
- 2 V Z Kolev, M J Lederer, B Luther-Davies, *et al.*. Passive mode locking of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser with an extra-long optical resonator [J]. Opt Lett, 2003, 28(14): 1275–1277.
- 3 L Kornaszewski, G Maker, M Butkus, *et al.*. SESAM-free mode-locked semiconductor disk laser[J]. Laser Photonics Rev, 2012, 6(6): L20–L23.
- 4 Huang Wenyu, Feng Dejun, Jiang Shouzheng, *et al.*. Erbium-doped fiber laser based on single-layer graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202001.

- 黄文育,冯德军,姜守振,等. 基于单层石墨烯可饱和吸收的掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202001.
- 5 Zhu Pan, Sang Mei, Gao Yang, *et al.*. Wavelength switchable passive mode-locking fiber laser based on single-wall carbon nanotube[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202005.  
朱攀,桑梅,高杨,等. 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202005.
  - 6 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103003.  
杨焕,黄珊,段军,等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103003.
  - 7 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.  
夏博,姜澜,王素梅,等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
  - 8 Liu Yang, Yu Jin, Zhang Xue, *et al.*. Investigation and application of coaxial output three-wavelength picosecond laser micro-machining system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051402.  
刘洋,余锦,张雪,等. 三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统的研制及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051402.
  - 9 G J Spuhler, T Sudmeyer, 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.
  - 10 F Brunner, E Innerhofer, S V Marchese, *et al.*. Powerful red-green-blue laser source pumped with a mode-locked thin disk laser [J]. Opt Lett, 2004, 29(16): 1921–1923.
  - 11 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(3): 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, 2013, 40(3): 0302010.
  - 12 L McDonagh, R Wallenstein, A Nebel. 110 W, 110 MHz repetition rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> MOPA pumped at 888 nm[J]. Opt Lett, 2007, 32(10): 1259–1261.
  - 13 Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang, *et al.*. 25 W high repetition rate picosecond green laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202010.  
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.
  - 14 M Larionov, F Butze, D Nickel, *et al.*. High-repetition-rate regenerative thin-disk amplifier with 116  $\mu\text{J}$  pulse energy and 250 fs pulse duration[J]. Opt Lett, 2007, 32(5): 494–496.
  - 15 C Honninger, R Paschotta, F Morier-Genoud, *et al.*. Q switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. J Opt Soc Am B, 1999, 16(1): 46–56.