

# 基于半导体可饱和吸收镜锁模的 $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ 飞秒激光器

张海鹏<sup>1,2</sup> 崔雪龙<sup>1</sup> 徐金龙<sup>2</sup> 杨 英<sup>2</sup> 何京良<sup>2</sup> 涂朝阳<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022  
<sup>2</sup> 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100  
<sup>3</sup> 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002

**摘要** 采用提拉法生长了  $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  晶体, 使用透射式半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 实现了激光二极管 (LD) 抽运的连续波锁模飞秒激光运转。当最大抽运功率为 8.6 W 时, 输出功率为 164 mW, 中心谱线为 1035 nm, 锁模脉冲的重复频率为 35 MHz。经测量此时锁模脉冲宽度为 246 fs。

**关键词** 激光器; 钨酸钇钠晶体; 半导体可饱和吸收镜; 锁模; 飞秒

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1102002

## CW Mode-Locked $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ Femtosecond Laser with a Semiconductor Saturable-Absorber Mirror

Zhang Haikun<sup>1,2</sup> Cui Xuelong<sup>1</sup> Xu Jinlong<sup>2</sup> Yang Ying<sup>2</sup> He Jingliang<sup>2</sup> Tu Chaoyang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

<sup>3</sup> Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

**Abstract**  $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  crystal is grown by the Czochralski method and a laser diode-pumped mode-locked  $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  femtosecond laser with a semiconductor saturable-absorber mirror (SESAM) is experimentally demonstrated. The average output power of 164 mW is obtained with the incident pump power of 8.6 W. The pulse duration is measured to be 246 fs with a repetition rate of 35 MHz at the central wavelength of 1035 nm.

**Key words** lasers;  $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  crystal; semiconductor saturable-absorber mirror; mode locking; femtosecond

**OCIS codes** 140.4050; 140.3615; 140.3480; 160.3380

## 1 引 言

利用锁模技术可以产生飞秒量级的超短脉冲。超短脉冲是探测物理过程、追踪化学和生物反应的一种重要工具, 被广泛应用于物理、化学、生物学、激光光谱学、光通信以及激光精细加工等众多领域<sup>[1~6]</sup>。探索适于产生超短脉冲激光的新型材料、研制新型超短脉冲光源已成为当今科学技术中的重要领域。

相对于掺  $\text{Nd}^{3+}$ , 掺  $\text{Yb}^{3+}$  类激光晶体在满足超快激光条件上更具优势<sup>[7~10]</sup>。 $\text{Yb}^{3+}$  是能级结构最简单的稀土激活离子, 仅有一个基态 $^2F_{7/2}$  和一个激发态 $^2F_{5/2}$ , 不存在激发态吸收和上转换, 光转换效率高, 荧光寿命较长。 $\text{Yb}^{3+}$  吸收带在 0.9~1.1  $\mu\text{m}$  范围内能与 InGaAs 激光二极管 (LD) 抽运源有效耦合, 且吸收线宽较宽。钨酸钇钠 [ $\text{Yb}:\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ ] 晶体属于四方晶系白钨矿结构, Y 和 Na 离子相互

**收稿日期**: 2012-05-25; **收到修改稿日期**: 2012-07-02

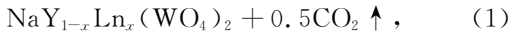
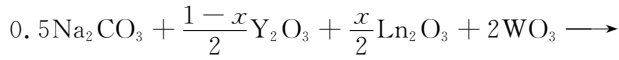
**基金项目**: 国家自然科学基金 (61078076), 山东省科技发展计划项目 (2010G0020423), 山东省高等学校科技计划项目 (J10LA12) 和福建省科技计划重点研究项目 (2010I0015) 资助课题。

**作者简介**: 张海鹏 (1978—), 男, 副教授, 主要从事激光物理与技术等方面的研究。E-mail: haikun\_zhang@163.com

位置并不固定,晶体具有无序结构,导致晶体中 Y 的吸收峰较宽,有利于 LD 抽运和实现宽带调谐。由于 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体热导性能差,难以生长出大尺寸高质量晶体,目前对于 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的研究主要集中在光谱特性<sup>[11]</sup>、连续激光<sup>[12,13]</sup>和调 Q 激光<sup>[14,15]</sup>输出上,对其锁模激光特性研究较少。本课题组在用提拉法制备 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的基础上,采用 LD 为抽运源和透射式半导体可饱和吸收镜(SESAM)为锁模器件,实现了飞秒激光运转。

## 2 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的制备

晶体生长所用的原料是纯度为 99.99% 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 通过以下固相反应合成 NaY<sub>0.95</sub>Yb<sub>0.05</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:



式中 Ln 为 Yb<sup>3+</sup>, x=0.05。在大气气氛中用提拉法生长,生长温度为 1211 ℃。生长条件为:拉速 0.4~1.2 mm/h,转速 11 r/min,冷却速率 12~30 ℃/h。为了减少由于晶体的各向异性导致晶体的热应力,选择<001>方向为籽晶的方向,得到了光学质量良好的透明晶体,如图 1 所示。

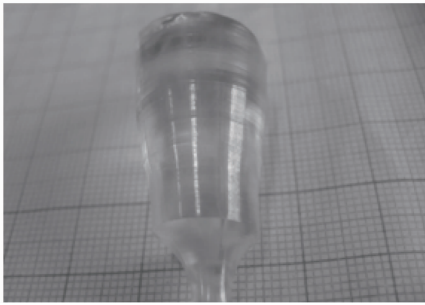


图 1 采用提拉法生长的 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体

Fig. 1 Crystal of Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> grown by Czochralski method

## 3 SESAM 锁模 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 飞秒激光器实验研究

采用光纤耦合 980 nm 半导体激光端面抽运 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体,实验装置如图 2 所示。输入镜 R1 为平镜,镀 980 nm 增透膜,对 1.0 μm 镀高反膜。腔镜 R2 和 R3 均为反射镜,曲率半径分别为 0.5 m 和 0.2 m。Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体沿 b 向切割,晶体尺寸为 4 mm×4 mm×4 mm,用水循环冷

却至室温 20 ℃。采用透射式 SESAM,对 1064 nm 的反射率为 96%,调制深度为 1.6%,弛豫时间为 10 ps,饱和光强为 70 μJ/cm<sup>2</sup>。实验中使用一对 Gires-Tournois 干涉镜(GTI1 和 GTI2)补偿腔内正色散,可以实现-925 fs<sup>2</sup>群延迟色散。脉冲的探测用快速光电二极管(NEW FOCUS 1611,上升时间为 0.4 ns)和泰克示波器(Tektronix DPO7104 1 GHz, 5×10<sup>-4</sup> T)。

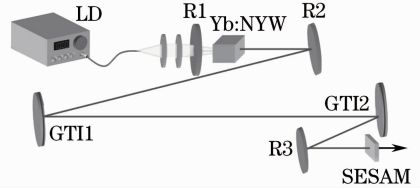


图 2 SESAM 锁模 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 飞秒激光器装置图  
Fig. 2 Experimental setup of the SESAM mode-locked Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser

当抽运功率超过 4.6 W 时,激光器便运转在连续波锁模状态。在 8.6 W 抽运功率下得到了平均功率为 164 mW 的连续稳定锁模输出,光-光转换效率 2%。图 3 分别给出了锁模脉冲的自相关曲线以

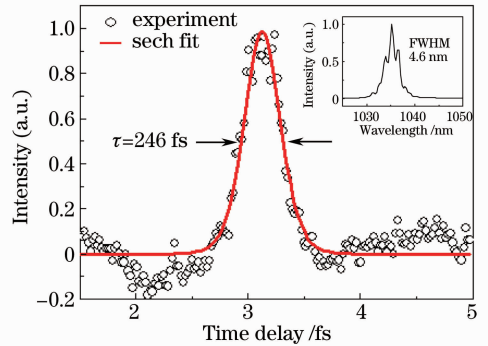


图 3 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 锁模的自相关曲线及激光光谱曲线

Fig. 3 Autocorrelation signals and laser spectrum of mode-locked Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser

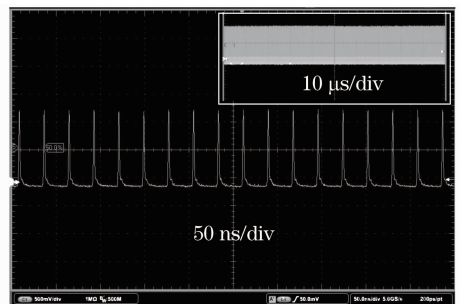


图 4 连续锁模脉冲序列波形图

Fig. 4 Pulse train of the CW mode-locked Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser

及输出激光的光谱曲线。利用自相关仪提供的双曲正割近似的计算公式得出锁模脉冲的半峰全宽(FWHM)为 246 fs, 中心谱线为 1035 nm, 谱线 FWHM 为 4.6 nm, 时间带宽积为 0.317。图 4 给出了 50 ns/div 和 10 μs/div 分辨率下稳定的连续锁模脉冲序列。由图 4 可见, 锁模脉冲的重复频率为 35 MHz, 这与腔内光子的往返时间一致。

## 4 结 论

采用提拉法成功制备了高质量的 Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体, 使用透射式半导体可饱和吸收镜, 实现了 LD 抽运的连续波锁模飞秒激光运转。当最大抽运功率为 8.6 W 时, 输出功率为 164 mW, 中心谱线为 1035 nm。锁模脉冲光谱宽度为 4.6 nm, 经自相关仪测量, 锁模脉冲宽度为 246 fs, 重复频率为 35 MHz。研究结果表明, Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体在超快激光领域有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 R. L. Fork, B. I. Greene, C. V. Shank. Generation of optical pulses shorter than 0.1 picosecond by colliding pulse mode locking [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(9): 671~672
- 2 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fs pulse generation from a self-mode-lock Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~45
- 3 U. Keller. Recent development in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- 4 A. Agnesi, F. Pirzio, G. Reali. Low-threshold femtosecond Nd:glass laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 9171~9176
- 5 A. Agnesi, A. Greborio, F. Pirzio *et al.*. 80-fs Nd:silicate glass

- laser pumped by a single-mode 200-mW diode[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10098~10103
- 6 Z. Cong, D. Tang, W. D. Tan *et al.*. Dual-wavelength passively mode-locked Nd:LuYSiO<sub>5</sub> laser with SESAM[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 3984~3989
  - 7 G. Paunescu, J. Hein, R. Sauerbrey. 100-fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(5): 555~558
  - 8 S. V. Marchese, C. R. E. Baer, R. Peters *et al.*. Efficient femtosecond high power Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin disk laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16966~16971
  - 9 B. Zhou, Z. Wei, Y. Zou *et al.*. High-efficiency diode-pumped femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 288~290
  - 10 A. Yoshida, A. Schmidt, V. Petrov *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb:YCOB laser generating 35 fs pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(22): 4425~4427
  - 11 Zhu Zhongli, Zheng Fanming, Ge Jianjun *et al.*. Growth and properties of Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal[J]. *J. Materials Science & Engineering*, 2005, **23**(1): 99~101
  - 朱忠丽, 曾繁明, 葛建军等. Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体生长及性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2005, **23**(1): 99~101
  - 12 G. Q. Xie, D. Y. Tang, H. J. Zhang *et al.*. Efficient operation of a diode-pumped Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1686~1691
  - 13 You Zhenyu, Tu Chaoyang, Li Jianfu *et al.*. Study on the growth and properties of large sized Nd<sub>3+</sub>/Yb<sub>3+</sub>:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystal [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2011, **40**(5): 1087~1092
  - 游振宇, 涂朝阳, 李坚富等. 大尺寸优质激光晶体 Nd<sub>3+</sub>/Yb<sub>3+</sub>:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 的生长和性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2011, **40**(5): 1087~1092
  - 14 Junhai Liu, Huajin Zhang, Jiyang Wang *et al.*. Continuous-wave and Q-switched laser operation of Yb:NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 12900~12904
  - 15 H. Luo, D. Y. Tang, G. Q. Xie *et al.*. High-power mode-locked operation of Yb-doped NaY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> end-pumped by laser diodes[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(9): 651~654