

文章编号: 0258-7025(2010)09-2380-04

激光二极管抽运 Yb:YSO 被动锁模激光的特性

刘成成¹ 刘 杰¹ 赵日峰¹ 王伟卫¹ 刘 莹¹ 牛荣莲¹ 郑丽和² 苏良碧² 徐 军²

(¹ 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014
² 中国科学院上海硅酸盐研究所透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201800)

摘要 采用结构紧凑的 W 型谐振腔设计, 利用激光二极管(LD)抽运掺镱硅酸钇(Yb:YSO)晶体, 用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为被动锁模元件, 实现了稳定的连续锁模皮秒激光运转。在抽运功率为 13.5 W 时, 获得了平均功率 2.39 W 的连续锁模输出, 重复频率为 104 MHz, 实际测得脉冲宽度为 3.2 ps, 中心波长为 1043.5 nm, 光谱半峰全宽约为 1 nm。

关键词 激光器; 激光二极管抽运; Yb:YSO 晶体; 被动锁模

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2380

Characterization of Laser Diode-Pumped Passively Mode-Locked Yb:YSO Laser

Liu Chengcheng¹ Liu Jie¹ Zhao Yuefeng¹ Wang Weiwei¹ Liu Ying¹
Niu Ronglian¹ Zheng Lihe² Su Liangbi² Xu Jun²

¹ College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China

² Key Laboratory of Transparent and Opto-Functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In the W type cavity, a laser diode-pumped passively mode-locked Yb:YSO laser is demonstrated with semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). At the pump power of 13.5 W, the average output pulse power is 2.39 W, and the repetition rate is 104 MHz. The actual pulse width is 3.2 ps, the center wavelength is at 1043.5 nm, and the full-width at half-maximum of the spectrum is 1 nm.

Key words lasers; laser diode-pumped; Yb:YSO crystal; passively mode-locked

1 引 言

近年来,以人工晶体为基础材料的全固态激光器向实用化快速发展,其中研制适合于激光二极管(LD)抽运的超快激光增益和放大晶体成为激光材料主流方向之一,探索它们的超快激光特性是当前激光界的热点课题。掺 Yb³⁺ 激光晶体在 900~980 nm 范围内具有较强的吸收,能与高效的 InGaAs LD 有效地耦合,且能级结构比较简单,仅有基态²F_{7/2}和激发态²F_{5/2}两个电子态,量子效率高,

有效地避免了交叉弛豫过程、激发态吸收和上转换现象,另外,与掺 Nd³⁺ 介质相比掺 Yb³⁺ 晶体具有更宽的发射荧光带宽,适合 1 μm 波段的可调谐激光运转和超短脉冲的产生,用掺 Yb³⁺ 晶体作为增益介质的锁模激光器已有较多的报道^[1~14]。

Yb³⁺ 通常占据基质中低对称性的格位或多种格位,这种特殊的结构能够提供强的晶体场,有利于吸收峰和发射峰的展宽。硅酸盐基质正属于低对称性的单斜晶系,由于其具有这种独特的光学特性而备受

收稿日期: 2010-04-15; 收到修改稿日期: 2010-05-10

基金项目: 山东省科技攻关计划(20009GG10004033)资助课题。

作者简介: 刘成成(1987—),女,硕士研究生,主要从事半导体激光抽运超短脉冲激光方面的研究。

E-mail: lemon350@163.com

导师简介: 刘 杰(1963—),女,教授,硕士生导师,主要从事全固态激光技术和非线性光学等方面的研究。

E-mail: jieliu@sdnu.edu.cn(通信联系人)

人们关注。目前已经实现了 LD 抽运 Yb:GSO, Yb:GYSO, Yb:LSO, Yb:LYSO 等掺 Yb³⁺ 硅酸盐晶体的超快和可调谐激光运转^[7~14]。掺 Yb³⁺ 的稀土正硅酸盐晶体 Yb:YSO 的主吸收峰在 899, 917, 950 和 977 nm 附近。非常适用于 LD 抽运, 同时吸收和发射谱较宽, 有利于实现高效、宽调谐超快激光器运转。迄今为止, 人们仅对 Yb:YSO 晶体的基本激光特性进行了实验研究^[15~18], 但对其超快激光特性的报道并不多^[19]。本文采用结构紧凑的 W 型折叠腔, 半导体激光器抽运 Yb:YSO 晶体, 用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为被动锁模元件, 在未加色散补偿元件的情况下, 获得了稳定的连续被动锁模皮秒激光运转。

2 实验装置

LD 抽运 Yb:YSO 被动锁模激光器的实验装置如图 1 所示, 抽运源是光纤耦合输出的半导体激光器, 为了使其发射波长与激活离子的吸收峰更好地吻合, 通过调节 LD 的温度使其发射波长稳定在 977 nm 附近。抽运源的光纤芯径为 400 μm , 数值孔径 (NA) 为 0.22, 最大输出功率为 30 W。抽运光束被一对聚焦比例为 1:0.5 的耦合透镜组准直聚焦到晶体上, 聚焦后光斑半径为 100 μm 。实验采用的 Yb:YSO 晶体由提拉法制作而成, Yb³⁺ 掺杂的原子数分数为 5%, 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 2 mm, 两面均镀有 1030~1080 nm 和 976 nm 的增透膜。为了有效冷却晶体, 用烟箔包裹晶体固定于紫铜冷却片内, 并用循环水系统对紫铜片进行冷却, 使晶体表面温度维持在 14 $^{\circ}\text{C}$ 左右。实验中所用的 SESAM 片由 25 层四分之一波长对 GaAs/AlAs 布拉格反射层组成, 其对 1040 nm 激光波长的反射率为 99%, 一层 15 nm 厚的 In_{0.3}Ga_{0.7}As 单量子阱植入最上层的布拉格层中以实现 1040 nm 激光波长的饱和吸收。

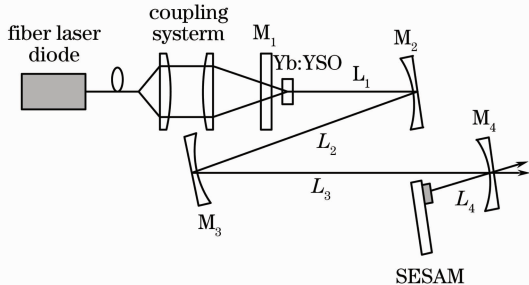


图 1 Yb:YSO 被动锁模激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of passively mode-locked

Yb:YSO laser

In_{0.3}Ga_{0.7}As 吸收体在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下低温生长, 具有短的饱和恢复时间, SESAM 的调制深度小于 1%。

实验所用 W 型谐振腔包括 5 个镜子: 输入镜 M₁ 为平面镜, 其前后表面均镀有 976 nm 的增透膜, 后端面镀有 1030~1080 nm 的高反膜; M₂ 和 M₃ 为曲率半径分别是 200 mm 和 800 mm 的凹面镜, 均镀有 1030~1080 nm 的高反膜; M₄ 为 1030~1080 nm 波段透射率 $T=1\%$ 的凹透镜, 曲率半径为 80 mm; 在腔内加入一片 SESAM, 既是被动锁模元件又兼作高反射镜, 激光束由凹透镜 M₄ 聚焦在 SESAM 上。Yb:YSO 晶体紧贴输入镜 M₁ 放置, M₂ 与 Yb:YSO 晶体的距离 $L_1=86$ mm, M₂ 与 M₃ 的距离 $L_2=418$ mm, M₃ 与 M₄ 的距离 $L_3=894$ mm, M₄ 与 SESAM 相距 $L_4=42$ mm; 总腔长 L 为 1440 mm。各镜间的折角小于 5 $^{\circ}$, 以便减小由折叠产生的像散。

为了使振荡激光与抽运激光尽可能达到最佳模式匹配, 振荡光的束腰半径要达到抽运光的光斑半径 (100 μm), 然而为了抑制多横模的产生, 晶体上的振荡光的基模光斑半径应略小于抽运光的光斑半径。利用 ABCD 传输矩阵理论计算晶体处的光斑半径约为 80 μm , SESAM 上的光斑半径为 31 μm , 抽运光与激光腔内振荡光光束的模式相匹配, 利于实现较高的功率运转。

3 实验结果与分析

采用以色列 OPHIR (30A-SH-V1) 激光功率计测量激光输出功率, 图 2 为所测量到的激光输出功率和所对应的被吸收的抽运功率的实验曲线, 输出功率随抽运功率的增加而增加。激光器的阈值功率为 2.55 W, 随着抽运功率的增加, 激光器以调 Q 方式运转, 当抽运功率增加到 7.88 W 时, 腔内功率密

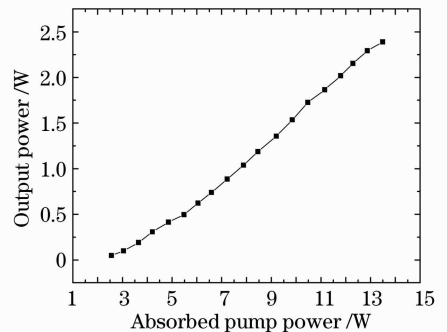


图 2 激光输出功率随吸收抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Yb:YSO passively mode-locked output power

versus absorbed pump power

度足够高,得到稳定的连续锁模运转。当抽运功率增加到 13.5 W 时,平均输出功率为 2.39 W,激光斜率效率为 21.8%,随着抽运功率的增加没有出现饱和现象,出于保护激光晶体考虑,没有继续加高功率。在抽运功率为 12 W 时,测得 1 h 内每隔 5 min 的输出功率 p_i ,如果输出功率的波动程度 $\Delta \bar{p}$ 由公式 $\Delta \bar{p} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 / n}$ 计算得到,那么 Yb: YSO 激光的不稳定度 $\Delta \bar{p} / \bar{p}$ 为 0.9%。

实验中用上升时间为 400 ps 的 NEW FOCUS 1611 快速光电探头接收产生的激光脉冲,并用 Tektronix 公司生产的带宽为 1 GHz 的数字示波器

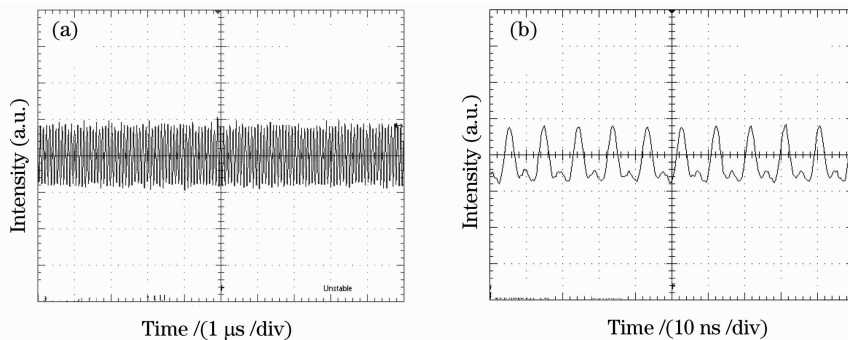


图 3 被动锁模波形

Fig. 3 Mode-locked pulse train in different time scales

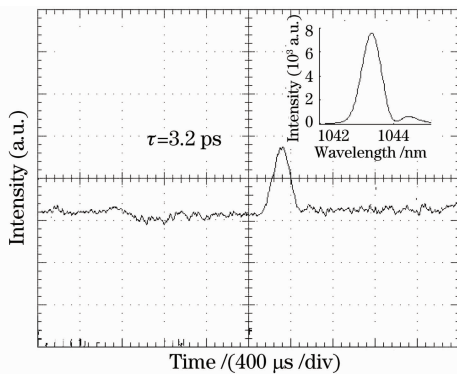


图 4 Yb: YSO 激光器被动锁模自相关波形和相应的光谱图

Fig. 4 Autocorrelation trace and corresponding spectrum of Yb: YSO picosecond laser

4 结 论

用半导体激光抽运 Yb: YSO 晶体,用 SESAM 作被动锁模元件,在未加色散补偿元件的情况下,获得了稳定的连续被动锁模皮秒激光运转。在抽运功率为 13.5 W 时,获得了中心波长为 1043.5 nm,光谱半峰全宽约为 1 nm,平均功率为 2.39 W 的连续锁模输出,相应的重复频率为 104 MHz,实际测得

(Tektronix TDS5104)记录各阶段的波形。连续锁模的脉冲宽度由二次谐波效应自相关仪(FR-103XL, Femtochrome, Reaearch Inc)测得。图 3(a),(b)分别是抽运功率为 9.85 W 时,在 1 μs 和 10 ns 时间尺度下测得的连续锁模脉冲波形。连续锁模脉冲的重复频率为 104 MHz,与理论计算数值相符[锁模脉冲重复频率由公式 $f = c / (2L)$ 给出, c 为光速, L 为激光谐振腔的总长度]。图 4 为用自相关仪记录下的自相关曲线,锁模脉宽为 3.2 ps。由光谱仪(AvaSpec-2048-SPU)可测得输出脉冲中心波长为 1043.5 nm,光谱半峰全宽约为 1 nm,相应的光谱图在图 4 的右上角。

脉冲宽度为 3.2 ps。

参 考 文 献

- Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb: YAG ceramic laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 8919~8925
 - Gary R. Holtom. Mode-locked Yb: KGW laser longitudinally pumped by polarization-coupled diode bars [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2719~2721
 - A. Shirakawa, K. Takaichi, H. Yagi *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb³⁺: Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2911~2916
 - H. Liu, J. Nees, G. Mourou. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb: KY(WO₄)₂ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1723~1725
 - Simon Rivier, Xavier Mateos, Junhai Liu *et al.*. Passively mode-locked Yb: LuVO₄ oscillator [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11668~11671
 - U. Griebner, S. Rivier, V. Petrov *et al.*. Passively mode-locked Yb: KLu(WO₄)₂ oscillators [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3465~3470
 - Wenxue Li, Haifeng Pan, Liang'en Ding *et al.*. Diode-pumped continuous-wave and passively mode-locked Yb: GSO laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 686~695
 - Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. LD pumped Yb: GYSO CW mode-locked laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 719~720
- 徐世祥, 李文雪, 郝强等. 半导体激光器抽运新型 Yb: GYSO 混晶实现连续锁模激光输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 719~720

- 9 Wang Weiwei, Chen Fei, Hong Zhengping *et al.*. A diode pumped Yb:LSO self-mode-locked laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1802~1805
王伟卫, 陈飞, 洪正平等. 激光二极管抽运 Yb:LSO 自锁模激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1802~1805
- 10 Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua *et al.*. Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1806~1809
周斌斌, 邹育婉, 李德华等. 连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1806~1809
- 11 Yi Xu, Xiaoyan Liang, Juan Du *et al.*. Efficient tunable diode-pumped CW Yb:LSO laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 27~28
- 12 J. Liu, W. W. Wang, C. C. Liu *et al.*. Efficient diode-pumped self-mode-locking Yb:LYSO laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **7**(2): 104~107
- 13 Juan Du, Xiaoyan Liang, Yi Xu *et al.*. Diode-pumped efficient laser action of Yb³⁺:LYSO crystal[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 172~174
- 14 Guo Kai, Song Yanrong, Tian Jinrong *et al.*. Tunable laser characteristics of three Yb³⁺-doped crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1289~1292
- 15 M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Jane *et al.*. Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping[J]. *Appl. Phys. B.*, 2005, **80**(2): 171~176
- 16 R. Gaum, P. H. Haumesser, B. Viana *et al.*. Optical and laser properties of Yb:Y₂SiO₅ single crystals and discussion of the figure of merit relevant to compare ytterbium-doped laser materials[J]. *Opt. Materials*, 2002, **19**(1): 81~88
- 17 S. Chénais, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Thermal lensing measurements in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW[J]. *Opt. Materials*, 2003, **22**(2): 129~137
- 18 M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais *et al.*. First diode-pumped Yb-doped solid-state laser continuously tunable between 1000 and 1010 nm [J]. *Appl. Phys. B.*, 2004, **78**(1): 13~18
- 19 F. Thibault, D. Pelenc. Efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ high-power femtosecond laser operation[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1555~1557