

文章编号: 0258-7025(2009)07-1802-04

激光二极管抽运 Yb:LSO 自锁模激光器

王伟卫¹ 陈 飞¹ 洪正平¹ 范秀伟¹ 刘杰¹ 郑丽和² 苏良碧² 徐 军²

(¹ 山东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 利用激光二极管抽运掺镱硅酸镧(Yb:Lu₂SiO₅, Yb:LSO)晶体,在腔内不加任何主被动调制器、且腔内未插入硬光阑的情况下,实现了激光器的克尔透镜自锁模运转。采用 4 镜 Z 形折叠腔,在抽运功率为 15.8 W 时,得到平均功率达 2.05 W 的克尔透镜自锁模稳定脉冲输出,相应的斜率效率为 16.5%。

关键词 激光技术; 激光二极管抽运; Yb:LSO 晶体; 自锁模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1802

A Diode Pumped Yb:LSO Self-Mode-Locked Laser

Wang Weiwei¹ Chen Fei¹ Hong Zhengping¹ Fan Xiuwei¹ Liu Jie¹
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 A laser diode-pumped Kerr-lens self-mode-locked laser was achieved by using Yb:Lu₂SiO₅ (Yb:LSO) crystal without any active or passive modulators and hard diaphragm inside the cavity. With the incident pump power of 15.8 W, the output power of the Kerr-lens self-mode-locked pulse reaches 2.05 W in the four-mirror cavity, corresponding to a slope efficiency of 16.5%.

Key words laser technique; laser diode-pumped; Yb:LSO crystal; self-mode-locked

1 引 言

掺 Yb³⁺ 晶体具有能级结构简单、量子缺陷低、量子效率高等优点,与掺 Nd³⁺ 介质相比具有更宽的发射荧光带宽,适合宽带调谐激光运转和超短脉冲的产生。近年来使用掺 Yb³⁺ 晶体作为增益介质的超快激光振荡器已有很多报道^[1~8]。激光二极管抽运掺镱(Yb³⁺)超短脉冲激光器在光传感、激光测距、光通信等领域有广泛的应用。

自锁模即克尔透镜锁模技术作为获取超短脉冲方法之一,它是依赖于腔内介质克尔自聚焦效应,与放置于腔内光阑(硬光阑)或抽运光束(软光阑)相结合,其性能等效于插入腔内的一个快可饱和吸收体。

自锁模技术与半导体可饱和吸收体(SESAM)被动锁模相比,腔内无需加任何调制元件,结构简单,脉冲噪声低。目前已在 Yb:YAG, Yb:YVO₄, Yb:KYW 等激光器成功实现克尔透镜自锁模运转^[5~7]。

掺镱硅酸盐晶体一般对称性较低,因而具有较大的声子能量,使得能级劈裂较大,这样有利于粒子数反转的形成,较强的晶场使其具有较强的跃迁振子强度,使得吸收峰和发射峰展宽,吸收和发射截面也较大,加上强场耦合特性等独特的光学特性而备受人们关注^[1~4,9~16]。掺镱硅酸镧(Yb:Lu₂SiO₅, Yb:LSO)晶体具有宽的荧光光谱和高的热导率

收稿日期: 2009-03-24; 收到修改稿日期: 2009-04-14

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2007G01)资助项目

作者简介: 王伟卫(1983—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光抽运固体超短脉冲激光器方面的研究。

E-mail: wang3525269@163.com

导师简介: 刘 杰(1963—),女,教授,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@sdu.edu.cn (通信联系人)

(5.3 W/(m·K))^[16], 调谐范围大。Yb:LSO 晶体高效调谐及调 Q, 被动锁模激光输出已在较早的实验中得到证实^[12~16]。本文采用 Z 形折叠腔, 在腔内不加任何主被动调制器, 且腔内未插入硬光阑的情况下, 获得了激光二极管抽运 Yb:LSO 晶体稳定的克尔透镜自锁模脉冲运转。

2 实验装置

图 1 是激光二极管抽运 Yb:LSO 晶体自锁模实验装置图。实验中, 为了使抽运源的发射波长与激活离子的吸收峰更好地吻合, 通过调节 LD 的温度将其发射波长调节至 976 nm 附近。抽运源的最大输出功率为 30 W, 光纤芯径为 400 μm, 数值孔径 (NA) 为 0.22。光纤输出的激光经过聚焦耦合系统进行聚焦耦合, 聚焦比例为 1:0.5, 聚焦后光斑半径为 100 μm。Yb:LSO 晶体两面均镀有 1030~1080 nm 和 976 nm 的增透膜, 其尺寸为 3 mm×3 mm, Yb³⁺ 的掺杂原子数分数为 5%。晶体用铝箔包裹放在水冷装置中, 晶体冷却温度为 14 ℃。输入镜 M₁ 为凹面镜, 曲率半径 R₁ = 800 mm, 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 为凹面镜, 曲率半径分别为 R₂ = 200 mm 和 R₃ = 80 mm, 均镀有 1030~1080 nm 的高反膜; OC 为透过率为 T = 2% (中心波长在 1040 nm) 的输出镜。M₂ 与 Yb:LSO 晶体的距离 L₁ 为 165 mm, M₂ 与 M₃ 的距离 L₂ 为 445 mm, M₄ 与 M₃ 相距 45 mm; 总腔长 L 为 655 mm。为了尽量减小折叠产生的像散, 其各镜间的折叠角小于 5°。

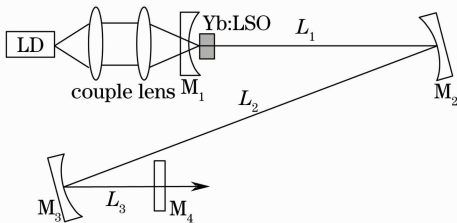


图 1 Yb:LSO 自锁模实验装置图

Fig. 1 configuration of Yb:LSO self-mode-locked laser

利用 ABCD 传输矩阵理论计算晶体处的光斑半径约为 90 μm, 略小于抽运半径 (100 μm), 抽运光与激光腔内振荡光光束的模式匹配, 以实现较高的功率运转。

3 实验结果与分析

自锁模技术是利用腔内介质克尔自聚焦效应,

与放置于腔内光阑 (硬光阑) 或抽运光束 (软光阑) 产生一个快可饱和吸收体, 进行锁模和脉冲压缩。在实验中, 实现自锁模的首要条件就是要通过对激光器各腔镜, Yb:LSO 晶体的相对位置的调节, 使激光器满足连续运转时的损耗较高, 而在锁模脉冲运转时相对损耗较低; 同时需要激光器在连续运转时, 腔内有足够高功率密度, 以增加初始脉冲产生的自聚焦效应。谐振腔的结构参数处在连续运转状态增益区边缘时, 有利于实现自锁模运转, 因为这时光阑处的光斑对功率的变化率最大, 即

$$\delta = \frac{1}{w} \left(\frac{dw}{dp} \right)_{p=0}$$

式中 w 为光斑半径, p 为光功率, 文献中称 δ 为自锁模启动因子^[17,18]。 δ 应该是负值而且绝对值应该尽量地大, 这样可以使激光器容易启动自锁模。一般而言, 为了使激光器在自锁模状态下正常工作, 要求腔内功率密度足够高, 增益介质中的光强足够强。本实验中, 为得到稳定的自锁模脉冲, 使用透过率比较低的输出镜, 当抽运功率达到 10.7 W 时, 激光器实现了自锁模运转。

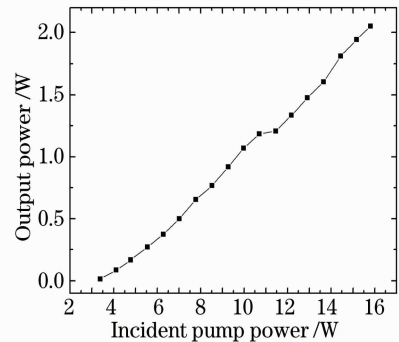


图 2 平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Dependency of average output power on pumped power

采用以色列 OPHIR (30A-SH-V1) 激光功率计测量功率, 图 2 给出了平均输出功率随抽运功率的变化关系。激光器的阈值功率为 3.37 W, 随着抽运功率的增加, 激光器以调 Q 锁模方式运转, 当抽运功率增加到 10.7 W 时, 腔内功率密度高, 得到了稳定的连续自锁模运转。在抽运功率为 15.8 W 时, 获得 2.05 W 的自锁模脉冲输出, 相应的光-光转换效率为 13.0%, 斜率效率为 16.5%。出于保护晶体的考虑, 实验中我们并没有继续加大抽运功率。实验中观测到, 在各种抽运功率下输出激光始终保持 TEM₀₀ 状态。连续观察 1 h, 激光器的功率抖动率小于 3%。

用上升时间为 400 ps 的 (NEW FOCUS 1611)

快速光电子探头接收所产生的激光脉冲,用 Tektronix 公司生产的 TDS5104(带宽 1 GHz)示波器记录各阶段的波形。图 3 给出了自锁模波形,由图可以看出锁模脉冲的重复频率为 228 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)。图 3(b)为存储图像的示波器记录下的单个脉冲,显示脉宽约为 889 ps,由于 PIN 光电二极管和示波器的响应速度所限,实际脉冲宽度要

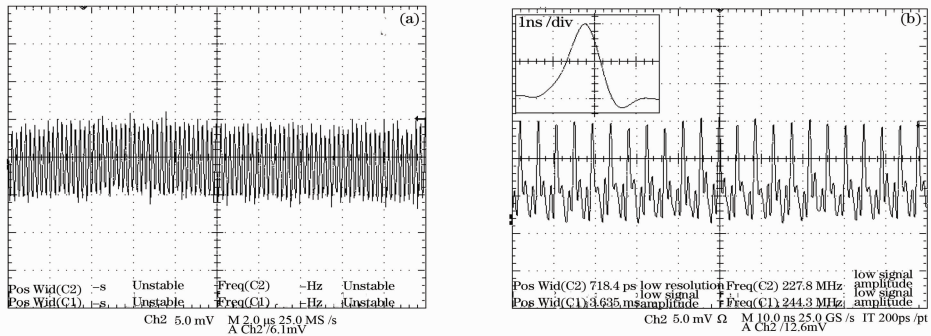


图 3 自锁模波形

Fig. 3 Self-mode-locked pulse train in different time scales

4 结 论

利用半导体激光器作为抽运源,在腔内未加任何主被动调制器的情况下,实现了 Yb:LSO 激光器的克尔透镜自锁模运转。当抽运功率为 15.8 W 时,得到功率为 2.05 W 的稳定锁模脉冲,重复频率为 228 MHz。若进一步添加色散补偿元件,改善激光运行参量,有望实现 Yb:LSO 晶体的超快脉冲输出。

参 考 文 献

- 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
- 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
郭凯,宋晏蓉,田金荣等. 掺 Yb³⁺ 晶体宽带可调谐激光输出特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1289~1292
- Li Wenxue, Xu Shixiang, Pan Haifeng *et al.*. Efficient tunable diode-pumped Yb:LYSO laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(15): 6681~6686
- Li Wenxue, Hao Qiang, Zhai Hui *et al.*. Diode-pumped Yb:GSO femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **5**(5): 2354~2359
- Yu Haijuan, Li Gang, Chen Meng *et al.*. Diode end-pumped kerr-lens mode-locked Yb:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers.* 2005, **32**(7): 878~880
于海娟,李港,陈檬等. 激光二极管抽运的克尔透镜锁模 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 878~880

比示波器显示的值窄得多,下一步通过改善测量条件,有望获得精确的脉冲宽度。在自锁模激光器中,自相位调制效应影响脉冲带宽,而群速度色散决定脉冲宽度,增加色散棱镜对进行色散补偿可以获得更短的脉冲。在本实验中,由于谐振腔腔长的限制,未加入色散棱镜对进行色散补偿。下一步工作将优化谐振腔,添加色散补偿元件,以获得更短的激光脉冲输出。

- 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
- A. A. Lagatsky, A. R. Sarmani, C. T. A. Brown *et al.*. Yb³⁺-doped YVO₄ crystal for efficient Kerr-lens mode locking in solid-state lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(23): 3234~3236
- Liu Qingwen, Wang Qingyue, Xue Yinghong *et al.*. 2.41 W ultrashort pulsed laser output from laser diode pumped Yb³⁺-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers.*, 2008, **35**(6): 819~822
刘庆文,王清月,薛迎红等. 激光二极管抽运掺 Yb³⁺ 光纤放大器获得 2.41 W 超短脉冲输出[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 819~822
- Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Laser diode-pumped efficient tunable Yb:LYSO laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 007~008
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型高效、调谐 Yb:LYSO 激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 007~008
- Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Efficient laser-diode end-pumped passively Q-switched mode-locked Yb:LYSO laser based on SESAM [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(2): 548~551
- L. Zheng, J. Xu, G. Zhao *et al.*. Bulk crystal growth and efficient diode-pumped laser performance of Yb³⁺:Sc₂SiO₅ [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(3-4): 443~445
- 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
- Yi Xu, Xiaoyan Liang, Juan Du *et al.*. Efficient tunable diode-pumped CW Yb:LSO laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(S1): S27~S28
- M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel *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
- F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon *et al.*. Efficient diode-pumped

- Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ high-power femtosecond laser operation [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1555~1557
- 16 Song Yanrong, Hu Jianghai, Zhou Jinfeng *et al.*. Laser diode-pumped Q-switched Yb:LSO laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2006, **33**(10): 1297~1300
宋晏蓉, 胡江海, 周劲峰 等. 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb:LSO 激光器[J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1297~1300
- 17 Zhang Ning, Xing Qirong, Han Xiuqin *et al.*. Study on self-starting of self-mode-locked solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2001, **A28**(4): 293~297
张宁, 邢岐荣, 韩秀芹 等. 自锁模固体激光器自启动理论研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4): 293~297
- 18 Falihati • Mijiti, Toran • Vajidi. Optimal cavities for self-mode locking of solid-state lasers with self-focusing [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2003, **30**(12): 1079~1082
帕力哈提 • 米吉提, 陶然 • 瓦吉地. 自聚焦型自锁模固体激光器谐振腔的最优化研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1079~1082