

文章编号: 0258-7025(2009)07-1806-04

连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究

周斌斌¹ 邹育婉¹ 李德华¹ 魏志义¹ 郑丽和² 苏良碧² 徐 军²

(¹中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

²中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

摘要 报道了稳定连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光脉冲的产生研究。实验中增益介质采用原子数分数为 5% 掺杂的 Yb³⁺:Lu₂SiO₅ (Yb:LSO) 激光晶体, 利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为被动锁模元件。在 2 W 抽运功率下, 获得了平均功率 70 mW 的 Yb:LSO 激光稳定锁模输出, 重复频率 69.8 MHz; 实际测得脉冲宽度为 3.6 ps, 脉冲中心波长可分别运转于 1047 nm 及 1066 nm。

关键词 激光器; 掺镱介质激光器; 被动锁模; 皮秒; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1806

Experimental Study of Continuous-Wave Mode-Locked Picosecond Yb:LSO Laser

Zhou Binbin¹ Zou Yuwan¹ Li Dehua¹ Wei Zhiyi¹ Zheng Lihe² Su Liangbi² Xu Jun²

(¹Laboratory of Optical Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Beijing 100190, China)

²Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A stable continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser was demonstrated. The 5% doped Yb³⁺:Lu₂SiO₅ (Yb:LSO) crystal was used as the laser medium, and a semiconductor saturable absorber was employed to realize mode-locking. With the pump power of 2 W, the output picosecond pulse power is 70 mW, at the repetition rate of 69.8 MHz. The measured pulse width is 3.6 ps, and the center wavelength can be at 1047 nm or 1066 nm.

Key words lasers; ytterbium doped lasers; passively mode-locking; picosecond; semiconductor saturable absorber mirror

1 引 言

随着超快激光科学技术的迅速发展与应用, 能够采用半导体激光直接抽运的超快激光光源以其结构紧凑、造价相对低廉等优点引起了广泛的关注。在众多能够采用半导体激光器直接抽运的激光介质当中, 掺 Yb³⁺ 激光晶体有发射带宽较宽、能级结构简单、量子损耗小、热效应低等显著优点。近年来, 随着众多新型掺 Yb³⁺ 晶体材料的成功研制, 并结合日益成熟的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 技术,

自启动锁模的掺 Yb³⁺ 超快激光已经成为提供 1 μm 波段稳定超快光源的一种重要手段。到目前为止, 人们已经在多种不同类型的掺 Yb³⁺ 晶体作增益的激光中开展了锁模实验研究, 并已在石榴石 Yb:YAG^[1], 钒酸盐 Yb:YVO₄^[2], 钨酸盐 Yb:KGW^[3], 硼酸盐 Yb:BOYS^[4], 硅酸盐 Yb:SYS^[5] 以及氧化正硅酸盐 Yb:LSO^[6] 等激光晶体中成功实现稳定的皮秒及飞秒脉冲输出。

掺 Yb³⁺ 的氧化正硅酸盐 (oxyorthosilicate) 晶

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(10874237, 6080807, 60878015)及中国科学院知识创新方向性项目(KJXC2-SW-T12)资助课题。

作者简介: 周斌斌(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事超短激光脉冲产生等方面的研究。

E-mail: bbzhou@aphy. iphy. ac. cn

导师简介: 魏志义(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事超强超短脉冲激光及新型全固态激光等方面的研究。

E-mail: zywei@aphy. iphy. ac. cn(通信联系人)

体材料是一类重要的应用于超快激光产生的 Yb 材料。这类晶体材料一般在基态 $^2F_{7/2}$ 能级拥有较大的能级分裂,这有助于限制激光下能态的热布居,从而获取高效的激光输出;此外,此类晶体的热传导率在掺 Yb 晶体中相对较高,这一优势对获取高功率激光运转至关重要。到目前为止,国际上已经分别有利用 Yb:LSO 和 Yb:YSO^[6], Yb:GSO^[7], Yb:GYSO^[8]等掺 Yb 氧化正硅酸盐材料实现飞秒激光脉冲的报道。其中对于 Yb:LSO 激光的研究,国内报道了可调谐连续激光^[9]以及被动调 Q 激光^[10]的实验研究,但未见锁模 Yb:LSO 激光的报道。本文利用连续钛宝石激光作为抽运源,实现了连续锁模的自启动皮秒 Yb:LSO 激光运转。

2 实验装置

实验装置采用如图 1 所示的 Z 型折叠腔结构。其中 M1, M2, M3 为曲率半径 100 mm 的宽带双色凹面镜,其对 976 nm 波段抽运激光透过率大于 95%,对 1020 ~ 1120 nm 波段的反射率大于 99.9%;输出镜 OC 的透过率为 0.5%。实验采用掺杂原子数分数为 5%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 3 mm 的 Yb:LSO 晶体作为增益介质。为了有效冷却晶体,使用钢箔对晶体侧面进行包裹,然后将其夹持于紫铜冷却片内,实验过程中使用循环水系统对紫铜晶体夹冷却,将晶体表面温度维持在 12 ℃ 左右。抽运光源采用波长为 976 nm 的连续钛宝石激光,最大输出功率为 2 W;抽运激光通过焦距为 100 mm 的透镜耦合至增益介质中。在腔内加入一片半导体可饱和吸收镜,以获取自启动被动锁模激光运转。

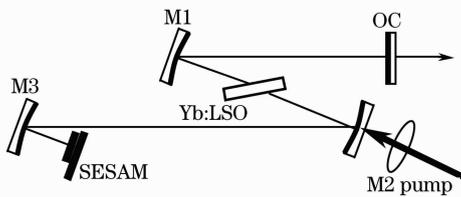


图 1 自启动锁模 Yb:LSO 激光实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the self-starting mode-locked Yb:LSO laser

3 实验结果与讨论

调 Q 现象的克服是实现掺 Yb 介质激光器连续被动锁模的一项重要内容。克服调 Q 的稳态锁模条件可由以下方程描述^[11]: $E_p^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R$ 。其

中: E_p 为腔内脉冲能量,晶体饱和能量 $E_{sat,L} = \frac{h\nu}{m\sigma_L} \times \pi\omega_L^2$, m 为脉冲在谐振腔内循环一周经过晶体的次数, σ_L 为晶体受激发射截面, ω_L 为晶体上光斑束腰大小; SESAM 饱和能量 $E_{sat,A} = F_{sat,A} \times \pi\omega_A^2$, $F_{sat,A}$, ΔR 分别为 SESAM 的饱和通量和调制深度, ω_A 为 SESAM 上光斑束腰大小。由此可见,降低晶体及 SESAM 表面束腰,以及使用低的调制深度等措施将会有助于调 Q 锁模状态的抑制。实验中所采用的半导体可饱和吸收镜的调制深度仅为 0.4%,饱和能流密度为 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,非饱和吸收损失和弛豫时间分别为 0.3% 和 500 fs。此外,通过选取适当的腔型参数对腔内的光斑束腰进行控制,实际腔内光斑尺寸分布如图 2 所示,晶体中心束腰以及 SESAM 表面束腰半径分别为 30 μm 及 40 μm 左右,整个谐振腔长度为 2.15 m,对应脉冲重复频率为 69.8 MHz。通过对激光腔进行优化调节,当抽运功率增加到 1.1 W 时,得到了稳定的连续锁模脉冲序列,脉冲功率为 28 mW。在最高为 2 W 的抽运功率下,连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光脉冲输出功率为 70 mW;锁模脉冲的功率输出曲线如图 3 所示。锁模脉冲序列在不同时间尺度范围内的波形如图 4 所示。

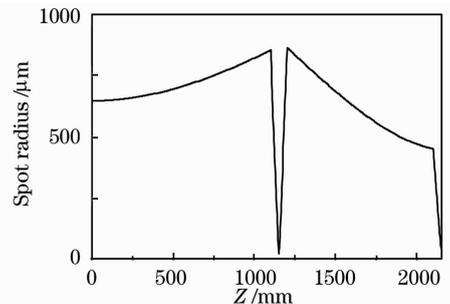


图 2 腔内光斑尺寸分布

Fig. 2 Dimensions of the intra-cavity beam spots

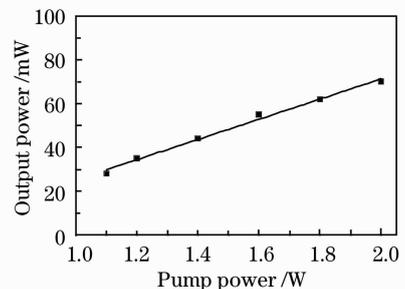


图 3 连续锁模脉冲的输出功率情况

Fig. 3 Mode-locked output power versus the pump power

图 5 是测量得到的脉冲光谱情况。在实验中发现,当微调凹面镜 M1 的位置时,输出脉冲的光谱会在如图 5(a),5(b)所示的两种情况间相互转换;中心波长分别位于 1047 nm 及 1066 nm。这种现象同

Yb:LSO晶体的发射谱有多个增益峰相关^[6];并且,类似的在间隔的波长区间锁模的现象也在另外一种硅酸盐晶体——Yb:GSO 晶体中报道过^[7]。

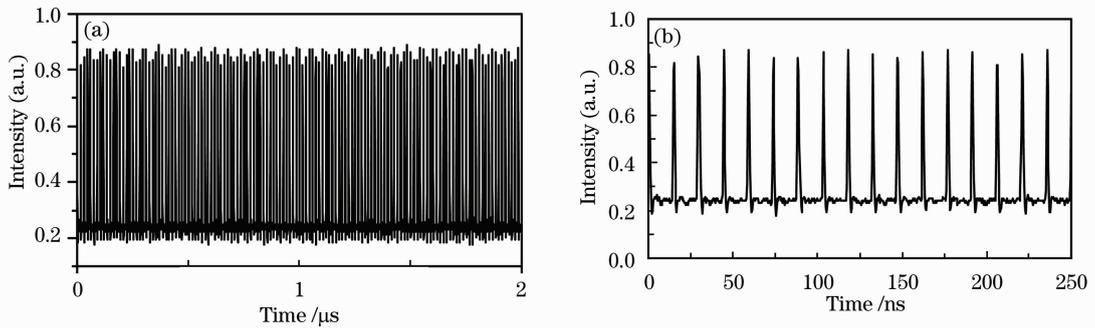


图 4 连续锁模脉冲波形。(a) 微秒尺度; (b) 纳秒尺度

Fig. 4 Oscilloscope trace of CW mode-locked pulses in μs scale (a) and ns scale (b)

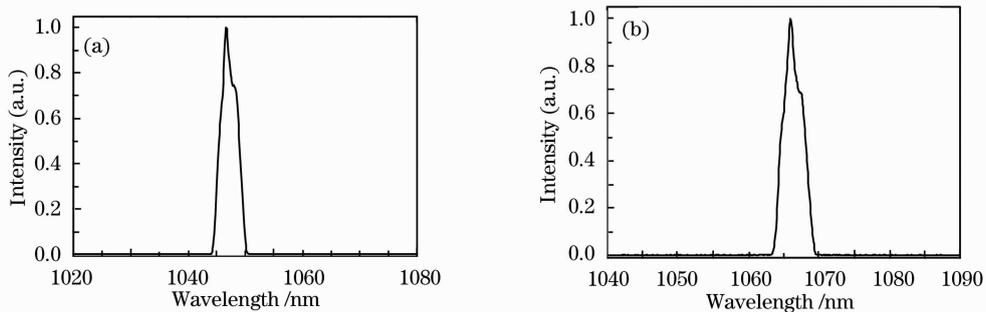


图 5 连续锁模脉冲的光谱。(a)中心波长为 1047 nm;(b)中心波长为 1066 nm

Fig. 5 Spectrum of the mode-locking pulses centered at 1047 nm (a) and 1066 nm (b)

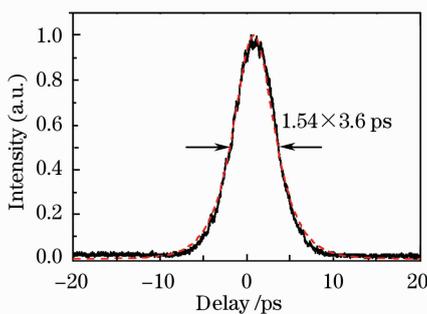


图 6 连续锁模脉冲强度自相关曲线

Fig. 6 Typical intensity autocorrelation of the pulses

利用商用的脉冲强度自相关仪(型号 FR-103 MN,美国 Femtochrome Research, Inc.)对激光脉冲的脉宽进行测量。测量中发现在两种不同中心波长脉冲输出的情况下,测到的脉冲宽度基本一致。典型的自相关测量结果如图 6 所示,测得的自相关波形对应的宽度为 5.5 ps,假定所获取脉冲为双曲正割型,则可得到所测锁模激光脉冲的半峰全宽(FWHM)为 3.6 ps。

4 结 论

利用连续钛宝石激光作为抽运源,实验实现了连续锁模的自启动皮秒 Yb:LSO 激光运转。在抽运功率为 2 W 时,锁模脉冲输出功率为 70 mW,实测脉冲宽度为 3.6 ps。在实验中发现输出的皮秒 Yb:LSO 激光的中心波长能够分别运转于 1047 nm 及 1066 nm。通过进一步采用高功率、高亮度的半导体激光器作为抽运光源,希望实现高功率、高效率的锁模 Yb:LSO 激光运转,从而提供一种紧凑、廉价的超快激光光源。

参 考 文 献

- 1 C. Hönninger, G. Zhang, U. Keller *et al.*. Femtosecond Yb:YAG laser using semiconductor saturable absorbers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23): 2402~2404
- 2 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
- 3 F. Brunner, G. J. Spühler, J. Aus der Au *et al.*. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO₄)₂ laser with 1.1-W average power [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1119~1121
- 4 F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut *et al.*. Diode-pumped Yb:

- Sr₃Y(BO₃)₃ femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 197~199
- 5 F. Druon, F. Balembois, P. Georges. Ultra-short-pulsed and highly-efficient diode-pumped Yb:SYS mode-locked oscillators [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 5005~5012
- 6 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
- 7 W. Li, Q. Hao, H. Zhai *et al.*. Diode-pumped Yb:GSO femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2354~2359
- 8 B. Zhou, Z. Wei, Y. Zhang *et al.*. Generation of 210 fs laser pulses at 1093 nm by a self-starting mode-locked Yb:GYSO laser [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 31~33
- 9 Y. Xu, X. Liang, J. Du *et al.*. Efficient tunable diode-pumped CW Yb:LSO laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(S): 27~28
- 10 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
- 11 C. Hönninger, 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

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术，近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于 2009 年 12 月正刊(EI 核心收录)上推出“激光制造”专题栏目，现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述，旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括：

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

特邀组稿专家：

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期：2009 年 9 月 30 日

投稿方式以及格式：

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱：zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿)，或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿)，详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjjg.htm>。本专题投稿文体不限，中英文皆可，其电子版请使用 MS-word 格式，有任何问题请咨询马沂编辑，E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部