

文章编号: 0258-7025(2010)09-2400-04

透射式 SESAM 实现 Nd:YAG 连续波 锁模皮秒脉冲激光

张海鹏^{1,2} 徐金龙² 黄海涛² 杨克建² 张百涛² 刘善德² 何京良²

(¹ 济南大学理学院, 山东 济南 250022
² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 使用透射式半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 实现了光纤耦合半导体激光抽运 Nd:YAG 晶体的连续波锁模运转。根据 ABCD 矩阵传输理论, 对激光器谐振腔的像散、稳定性与腔参数的关系进行了理论计算。在此基础上, 设计了 Z 型折叠激光谐振腔, 获得了稳定的 1064 nm 皮秒锁模激光输出。当抽运功率为 7.7 W 时, 最大输出功率为 372 mW。重复频率为 54 MHz。经测量此时锁模脉冲宽度为 8.9 ps。

关键词 激光技术; 半导体可饱和吸收镜; 连续锁模; 皮秒脉冲; Nd:YAG 激光器

中图分类号 O436; TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2400

Passively CW Mode-Locked Nd:YAG Picosecond Laser with a Partially Reflective Semiconductor Saturable-Absorber Mirror

Zhang Haikun^{1,2} Xu Jinlong² Huang Haitao² Yang Kejian² Zhang Baitao²
Liu Shande² He Jingliang²

¹ School of Sciences, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

² State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract A passively mode-locked Nd:YAG laser with a partially reflective semiconductor saturable-absorber mirror is reported. According to the well known ABCD matrix theory, the astigmatism and the stability in the cavity of the laser are theoretically analyzed. Stable continuous-wave mode locked pulses are achieved with a Z-type resonator. The average output power of 372 mW is obtained with the incident pump power of 7.7 W. The pulse duration is measured to be 8.9 ps with a repetition rate of 54 MHz at the central wavelength of 1064 nm.

Key words laser technique; semiconductor saturable-absorber mirror; mode locking; ps-pulse; Nd:YAG laser

1 引 言

利用锁模技术产生的皮秒、飞秒量级的超短激光脉冲, 具有高峰值功率、宽的光谱和高脉冲重复频率等优点, 作为揭示微观世界超快现象的重要手段, 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领域^[1~5]。近年来, 利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 特性实现的连续波锁模激光器由于结构简单和稳定等优点, 逐渐成为关注的热点^[6~11]。SESAM 可以分为反射式和透射式

两种。在驻波折叠谐振腔中使用反射式 SESAM 时, 一面反射镜往往还要作输出镜, 会产生两个方向的输出光。透射式 SESAM 不需要镀布拉格反射膜, 它通过在吸收区两侧分别镀增透膜和部分反射膜兼作输出镜, 从而实现一个方向的激光输出。

近年来, 国内外都有关于使用 SESAM 实现 Nd³⁺ 类激光器连续锁模的报道^[12~14]。虽然与 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 晶体相比, Nd:YAG 晶体的受激发射截面较小, 饱和吸收时间较大, 并不利于

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(10534020, 50721002)和山东省高等学校优秀青年教师国内访问学者项目资助课题。

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

抑制调 Q 锁模。但是从另一方面讲, Nd:YAG 晶体能大尺寸生长, 并且具有较高的热导率, 在大功率抽运时可以降低热透镜效应, 实现稳定锁模。2004 年陈檬等^[13]报道了利用反射式 SESAM 实现对 1.06 μm 波长 Nd:YAG 激光器的稳定连续锁模运转, 得到了脉宽为 9 ps 的光脉冲。目前, 关于反射式 SESAM 的报道较多, 而对于利用透射式 SESAM 实现连续锁模的报道较少。

本文采用激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体, 使用透射式 SESAM 作为被动锁模元件, 对输出全固态连续波锁模激光进行了研究。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源是最大输出为 30 W 的带光纤耦合的半导体激光器, 入射到 Nd:YAG 晶体上的光斑半径为 400 μm 。实验采用 Z 型腔, 可以方便地对腔内振荡光斑半径进行调节, 从而在 SESAM 处获得高的振荡光能量密度。输入镜 M_1 是一平面镜, 一端镀 808 nm 增透膜, 另一端镀 808 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜; M_2 和 M_3 是平凹镜, 曲率半径分别为 1000 mm 和 500 mm, 镀 1.06 μm 高反膜。采用透射式 SESAM, 对 1064 nm 波长的光的反射率为 96%, 调制深度为 1.6%, 弛豫时间为 10 ps, 饱和光强为 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。Nd:YAG 晶体尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 5 mm, 两端镀 808 nm 和 1.06 μm 增透膜, 用铝箔包裹放在紫铜块内, 放在紧靠输入镜的地方, 用水进行循环冷却至室温 18 $^{\circ}\text{C}$ 。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 Gs/s)。

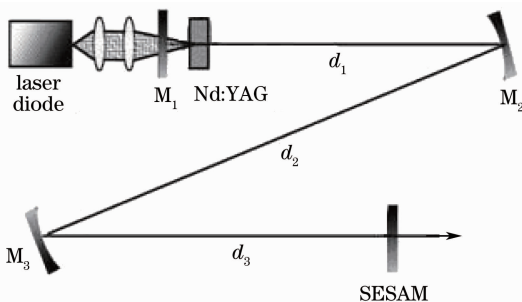


图 1 Nd:YAG 连续锁模激光器实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of the continuous-wave mode-locked Nd:YAG laser

3 实验数据与分析

在皮秒锁模激光器中, 要抑制自调 Q, 腔内脉冲

能量 E_p 应满足关系^[15]

$$E_p^2 > F_{\text{sat},L} A_L F_{\text{sat},A} A_A R, \quad (1)$$

式中腔内脉冲能量 $E_p = P_{\text{in}}/f$, P_{in} 为腔内平均功率, f 为脉冲重复频率, $F_{\text{sat},L} = h\nu/m\sigma$ 为激光介质的饱和通量, $h\nu$ 表示单光子能量, σ 为激光介质的受激发射截面, m 为脉冲往返一次通过激光介质的次数, $F_{\text{sat},A}$ 为 SESAM 的饱和通量, A_L, A_A 分别为腔模在激光介质和 SESAM 上的光斑面积, R 为 SESAM 的调制深度。通过谐振腔设计控制激光基模光斑在激光介质和 SESAM 上的面积大小。一般情况下 A_L 和 A_A 应尽量小以减小调 Q 锁模的阈值。但是过小的 A_L 会造成基模振荡光和抽运光不匹配, 使激光器效率下降。

另外, 由于谐振腔内有多个折叠反射镜, 容易造成子午面和切线面内的像散, 影响谐振腔内的光束质量。为了降低像散量, 谐振腔内各折叠镜的折叠角尽量小为宜。本实验中 M_2, M_3 的折叠角大约为 5° 。为了对谐振腔进行优化设计, 利用 ABCD 传输矩阵计算谐振腔的稳定区^[16], 如图 1 所示。 M_1 与 M_2 之间的距离为 d_1 , M_2 与 M_3 的距离为 d_2 , M_3 与 SESAM 的距离为 d_3 。计算中选择 d_2 为定值 200 cm, d_1 和 d_3 为变量, 来探究 d_1 和 d_3 以及总腔长 L 对谐振腔稳定性的影响。计算所得的谐振腔稳定区如图 2 所示。由图 2 可见, 所用的谐振腔属于不对称腔, 稳定区共分为 3 支。选择 d_1 和 d_3 分别为 49 cm 和 28 cm, 从而使谐振腔运转在第 1 支稳定区的中心。这样 d_1 和 d_3 在第 1 支稳定区上可以有较大的调节范围, 以便提高谐振腔的稳定性。

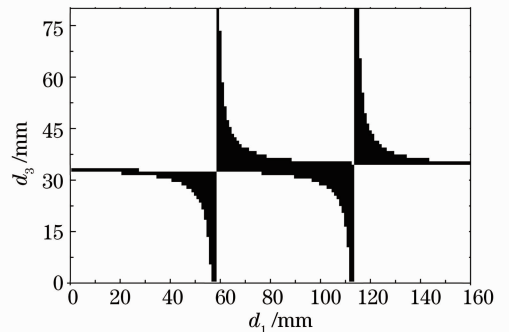


图 2 改变 d_1 和 d_3 数值时的谐振腔稳定区
Fig. 2 Stability region depending on d_1 and d_3
腔内各处的振荡光斑半径^[17]可以表示为

$$\omega = (\lambda/\pi)^{1/2} B^{1/2} / \left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{1/4}, \quad (2)$$

式中 A, B, D 是实验装置对应 ABCD 矩阵中的矩阵元, λ 表示谐振腔内光波的波长。以输入镜 M_1 为起

点, SESAM 为终点, 可计算得到线性状态下谐振腔内各处光斑的半径分布, 如图 3 所示。可以看出, 子午面和切线面内的激光光束半径基本相吻合, 从而保证了腔内的低像散量。此时, 激光晶体内振荡模式半径在子午面和切线面内分别为 $300 \mu\text{m}$ 和 $320 \mu\text{m}$ 。在 SESAM 处, 光斑半径在子午面和切线面内分别为 $150 \mu\text{m}$ 和 $140 \mu\text{m}$ 。

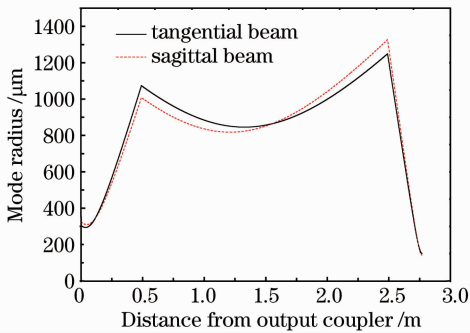


图 3 子午面和切线面内的激光束在谐振腔内的传播
Fig. 3 Tangential and sagittal beam propagation in the cavity

低的损耗可以提高腔内功率密度, 降低阈值反转粒子数密度, 实现低的激光振荡阈值。实验所用 SESAM 的透射率为 4%, 对应的损耗 $\ln(1/R)$ 为 0.04。如果把 SESAM 换为 5% 透射率的耦合输出镜, 则可以实现 Nd:YAG 激光器的连续运转。图 4 示出了 Nd:YAG 激光器连续和锁模运转时输出功率随抽运功率的变化曲线。当抽运功率超过阈值 0.5 W 时, 激光器运转在调 Q 锁模状态; 当抽运功率超过 3.7 W 时, 激光器便运转在连续波锁模状态。当抽运功率达到 7.7 W 时, 输出功率为 372 mW , 光-光转换效率为 4.8%。图 5 分别给出了在抽运功率为 7.7 W 时锁模脉冲的自相关曲线以及 Nd:YAG 激光的光谱曲线。利用自相关仪提供的双曲正割近似下的计算公式得出锁模脉冲的脉宽 $\tau = 8.9 \text{ ps}$, 中心谱线为 1064 nm , 谱线宽度为 0.6 nm ,

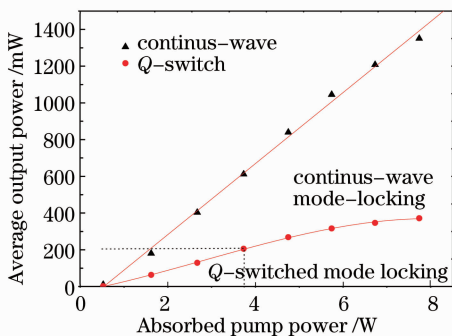


图 4 输出功率随抽运功率的变化曲线
Fig. 4 Curves of output power at different pump powers

时间带宽积 ($\tau \cdot \Delta\nu$) 为 1.41。通过示波器的波形检测锁模脉冲的稳定性, 连续观察 2 h, 未出现失锁现象, 锁模波形及其稳定性基本不变。图 6 给出了 20 ns 和 $2 \mu\text{s}$ 内的稳定的连续锁模脉冲序列。由图可见, 锁模脉冲的重复频率为 54 MHz 。

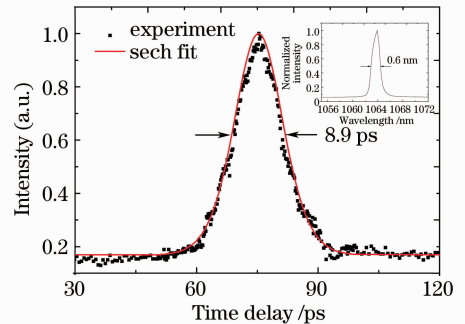


图 5 连线锁模脉冲的自相关曲线和 Nd:YAG 激光的光谱曲线

Fig. 5 Autocorrelation signals of the CW mode-locked pulses

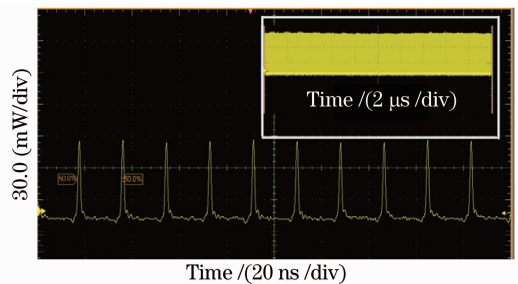


图 6 连线锁模脉冲序列波形图

Fig. 6 Pulse train of the CW mode-locked Nd:YAG laser

4 结 论

使用透射式半导体可饱和吸收镜, 采用 Nd:YAG 作激光晶体, 实现了 LD 抽运的连续波锁模激光运转。设计了 Z 型折叠激光谐振腔, 获得了稳定的 1064 nm 皮秒锁模激光输出。当抽运功率超过 3.7 W 时, 激光器便运转在连续波锁模状态。当最大抽运功率为 7.7 W 时, 输出功率为 372 mW , 光-光转换效率为 4.8%。锁模脉冲光谱宽度为 0.6 nm , 经自相关仪测量, 锁模脉冲宽度为 8.9 ps , 重复频率为 54 MHz 。

参 考 文 献

- 1 B. Y. Zhang, G. Li, M. Chen *et al.*. Passive mode-locking of a diode-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1829~1831
- 2 U. Keller. Recent development in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- 3 K. Yang, S. Zhao, J. He *et al.*. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser at $1.34 \mu\text{m}$ with V:YAG saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25):

20176~20185

- 4 Zhang Haikun, Chen Xiufeng, Wang Peiji *et al.*. Laser diode-pumped self-mode-locking laser with a self Q-switched Cr⁴⁺:Nd³⁺:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 738~742
 张海鹏, 陈秀峰, 王培吉 等. 激光二极管抽运 Cr⁴⁺:Nd³⁺:YAG 自锁模自调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 738~742
- 5 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
- 6 Jingliang He, Yaxian Fan, Juan Du *et al.*. 4-ps passively mode-locked Nd:Gd_{0.5}Y_{0.5}VO₄ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2803~2804
- 7 Yaxian Fan, Jingliang He, Yonggang Wang *et al.*. 2-ps passively mode-locked Nd:YVO₄ laser using an output-coupling-type semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(10): 101103
- 8 Peng Weihua, Song Lijun, Song Yanrong *et al.*. SESAM started KLM Cr⁴⁺:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 13~15
 裴为华, 宋丽军, 宋晏蓉 等. 半导体可饱和吸收镜自启动的 Kerr 锁模 Cr⁴⁺:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 13~15
- 9 Yu Haijuan, Li Gang, Chen Meng *et al.*. LD pumped Yb:YAG mode-locked laser with SESAM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 648~651
 于海娟, 李港, 陈檬 等. 用半导体可饱和吸收镜进行 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器被动锁模研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 648~651
- 10 Li Liwei, Wang Jiaxian, Wang Juanjuan. Study on passive mode-lock of pulsed Nd:YAG laser with SESAM[J]. *Laser Technol.*, 2008, **32**(3): 296~298
 李立卫, 王加贤, 王娟娟. SESAM 实现脉冲式 Nd:YAG 激光器的被动锁模特性研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(3): 296~298
- 11 Ban Wenzheng, Wang Li, Fan Feng *et al.*. Research on mode locking characteristics of all-solid-state mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1046~1050
 班文政, 王丽, 范锋 等. 全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1046~1050
- 12 Yulei Jia, Zhiyi Wei, Jiaan Zheng *et al.*. Diode-pumped self-starting mode-locked Nd:YVO₄ laser with semiconductor saturable absorber output coupler[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(11): 2209~2211
- 13 Cheng Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 646~648
 陈檬, 张丙元, 李港 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 646~648
- 14 Yang Liu, Liqun Sun, Yonggang Wang *et al.*. Contrastive study of two SESAMs for passive mode-locking in Nd:YVO₄ laser with low pump power[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 644~646
- 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
- 16 H. W. Kogelnik, Erich P. Ippen, A. Dienes *et al.*. Astigmatically compensated cavities for cw dye laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(3): 373~380
- 17 Sun Jinghua, Zhang Ruobing, Hu Youfang *et al.*. Theoretical analyse of the cavity of self-starting Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(6): 1272~1278
 孙敬华, 章若冰, 胡有方 等. 自启动 KLM 钛宝石激光器谐振腔的理论计算[J]. *物理学报*, 2002, **51**(6): 1272~1278