

文章编号: 0253-2239(2009)11-3103-05

半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究

李 霄¹ 王勇刚² 张世强^{1,3} 汪晓波¹ 许晓军¹

(¹ 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 南洋理工大学电机与电子工程学院微电子系, 新加坡 639798; ³ 63655 部队, 新疆 841700)

摘要 利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术实现的超快脉冲激光器具有结构简单紧凑、脉冲序列稳定等优势,在许多领域有着重要用途,自问世以来受到国内外的广泛关注。分析了 SESAM 被动锁模侧面抽运固体激光器的具体要求,进行了不同条件下的 SESAM 被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器实验。获得了最高平均功率 9.5 W,脉冲重复频率 71 MHz,单脉冲能量约 141 nJ 的皮秒激光脉冲。对 SESAM 被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器进行了实验和理论分析,对实现高功率连续超短脉冲激光器进行了探讨。

关键词 固体激光器;半导体可饱和吸收镜;锁模;侧面抽运;皮秒脉冲

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092911.3103

Passively Mode-Locked Side-Pumped Nd:YAG Laser with SESAM

Li Xiao¹ Wang yongang² Zhang Shiqiang^{1,3} Wang Xiaobo¹ Xu Xiaojun¹

¹ College of Opto electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Division of Microelectronics, School of Electronical & Electroinc Engineering, Nanyang Technological University 639798, Singapore

³ 63655 Unit of Chinese People's Liberation Army, Xinjiang 841700, China

Abstract Recently, semiconductor saturable absorbers mirror (SESAM) have become the important components in the compact mode-locking solid-state lasers. We designed a side-pumped folded cavity Nd:YAG solid laser mode-locking with SESAM and get the highest average output power about 9.45 W. The single pulse has about 141 nJ energy and 71 MHz repetitionrate. With exactly measurement about the thermal focal length, special cavity can be designed to control the mode radius. Although the laser was pumped by high power laser diode (LD) (over hundreds watts), but it still has very well beam quality (nearly the diffraction-limited beam). From this work, it get closer towards the high power mode-locked solid laser.

Key words solid-state laser; semiconductor saturable absorber mirror (SESAM); mode-locking; side-pumped; picosecond pulse

1 引 言

锁模激光器^[1]具有高峰值功率,高脉冲重复频率等优点,在激光加工、光纤通讯、非线性光学变换等领域有重要用途^[2,3]。常用的锁模方法有:碰撞锁模、克尔透镜锁模、可饱和吸收体锁模等。1992年,Ursula Keller等^[4]发明了半导体可饱和吸收镜

(SESAM),将其作为高反腔镜安置在合适的腔体即可有效地实现锁模。与一般的饱和吸收体锁模器件相比,SESAM有插入损耗小、结构简单等优点,自问世以来,SESAM锁模固体激光器技术就受到广泛关注,并获得了极大的发展。

激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 激光器是

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-02-25

作者简介: 李 霄(1983—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器被动锁模方面的研究。E-mail: crazy.li@163.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xu_xiaojun@126.com

目前使用最为广泛的高功率固体激光器,早在 2000 年,国外就将 SESAM 锁模技术应用于 LD 侧面抽运 Nd:YAG 激光器并实现了 10 W 的连续锁模皮秒脉冲激光器^[5]。国内的相关报道中,连续锁模激光器大多采用端面抽运结构^[6,7],而侧面抽运结构实现的 SESAM 被动锁模激光器往往采用脉冲式抽运^[8],无法实现大时间尺度上的连续,当前国内^[9~11] SESAM 锁模激光器功率均低于 5 W。本文对 SESAM 被动锁模 LD 侧面抽运 Nd:YAG 激光器^[12]进行了研究,采用不同方案实现了连续稳定锁模脉冲,获得了最高平均功率 9.5 W 的较好效果,对实现高功率连续稳定锁模皮秒脉冲激光器进行探索。

2 稳定锁模条件

文献[13]给出了 SESAM 稳定锁模固体激光器的阈值条件公式

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

其中 E_p 为锁模后腔内单脉冲能量, $F_{\text{sat},L} = h\nu/N\sigma$ 为增益介质的有效饱和和通量, $h\nu$ 为光子能量, A_L 为增益介质上光斑面积, N 为光在腔内往返一次经过增益次数, σ 为增益介质散射截面积, ΔR 为调制深度, $F_{\text{sat},A}$ 为 SESAM 的饱和和通量。

从(1)式的右侧可以看出,稳定锁模的关键在于选择适当的 SESAM 和增益介质,并设计能有效控制 SESAM 及激光棒表面的光斑面积的腔体以使 SESAM 适当的饱和。与 Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:YLF 等新型材料相比, Nd:YAG 的受激发射截面较小,不利于连续稳定锁模的实现。而(1)式左侧的单脉冲能量 E_p 主要取决于模块增益,选择合适的抽运结构可以有效提高系统增益,弥补 Nd:YAG 受激截面小的缺陷。

为验证模块增益对稳定锁模的影响,本文采用了两种不同的高功率 LD 侧面抽运模块进行实验,均采用环绕通水方式冷却。模块 1 为中科院半导体所提供的百瓦级大功率模块,工作电流 10~30 A,电压 50 V,抽运光功率 250~800 W 可调,激光棒尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 126 \text{ mm}$,周围有 5 组 LD 环绕抽运。模块 2 为北京吉泰科技提供的 GT75S 型侧面抽运模块,激光棒尺寸为 $\Phi 2 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$,工作电流 0~30 A,电压 20 V,抽运光功率 0~240 W 可调,由 3 组 LD 侧面环绕抽运。图 1(a), (b)给出了两模块抽运后的荧光分布图。

实现稳定锁模对激光器的光束质量要求很高,

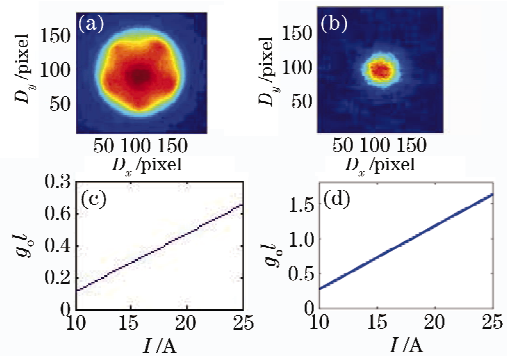


图 1 抽运模块对比,模块 1(a)模块 2(b)抽运后荧光分布图,模块 1(c),模块 2(d)基模小信号增益

Fig. 1 Comparison of the two module, the fluorescence distribution of module 1(a), module 2 (b), the gain of fundamental mode in module 1 (c), module 2 (d)

因此必须在腔内加入限模小孔,孔径及位置须根据 ABCD 理论详细计算。根据文献[14,15]可以估算出模块基模小信号增益如图 1(c), (d)所示,对比图 1(a)~图 1(d)可知,尽管模块 2 抽运功率和多模出光功率远低于模块 1,但抽运均匀性和基模小信号增益均优于模块 1。

3 谐振腔设计

经过调研和试验,选定了图 2 所示 Z 型折叠腔结构。两面共焦的凹面全反镜组成一个望远镜系统,该结构优势在于可以根据参数计算出合适的放大率直接选择相应的腔镜组进行实验。望远镜腔还可以在保持放大率不变的条件下,方便的改变腔镜焦距组合实现更长的腔体,对进一步降低重复频率,提高单脉冲能量和峰值功率有重要意义。

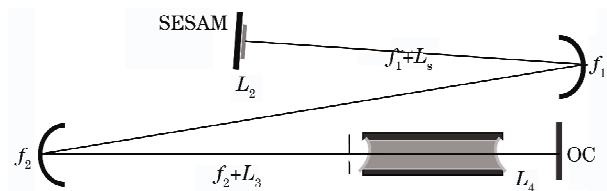


图 2 激光器腔体示意图

Fig. 2 Schematic of the laser cavity

根据文献[12,14]中对模块 1 的热透镜效应测量结果,分析 SESAM 表面光斑半径 w_s 及激光棒表面光斑半径 w_l 随各臂长的变化。最终选定 L_s 为可调臂长。

如图 3 所示,在调整范围内 SESAM 表面光斑变化较大,而增益介质表面光斑变化较小,可以认为在不影响出光功率及光束质量条件下实现 SESAM

表面光斑的单独调整。实验中通过微调 SESAM 位置,可实现其表面光斑大小连续可调,便于寻找合适

的光斑尺寸以满足(1)式条件。

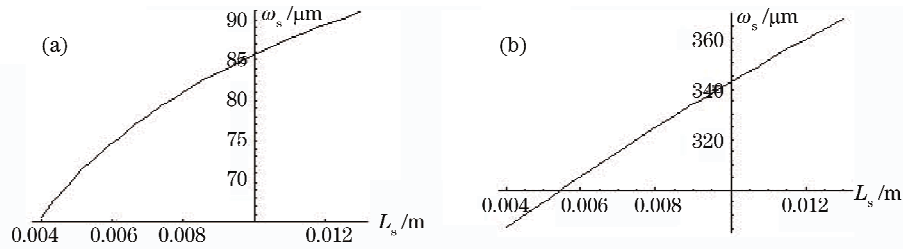


图 3 SESAM(a)及增益介质(b)表面的光斑半径 ω_s, ω_L 与 L_s 间的关系
Fig. 3 Relation between ω_s, ω_L and L_s of SESAM (a) and gain medium (b)

4 实验分析

本文用模块 1,2 进行了多次 Z 型折叠腔结构的 SESAM 被动锁模实验。最终模块 1^[12] 在约 440 W 抽运条件下,实现了如图 4(a)所示最高平均功率

4.7 W,重复频率 55 MHz,单脉冲能量 85 nJ 的连续稳定皮秒锁模脉冲。所用 SESAM 为 BATOP 公司提供的 SAM-1064-1 型,调制深度为 0.5%,饱和通量 $90 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

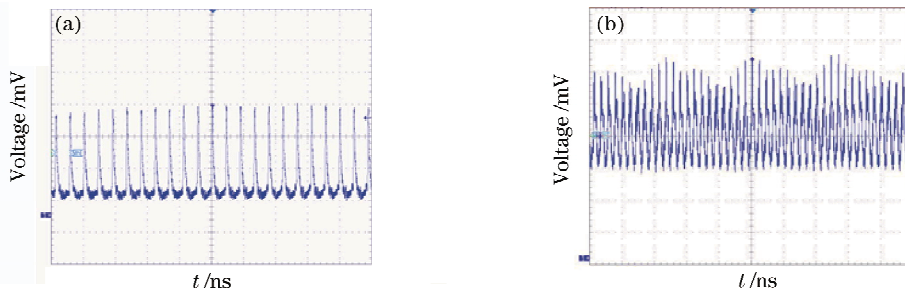


图 4 相同条件下模块 1(a)、2(b)波形对比

Fig. 4 Waveform comparison of mode-locked pulse with module 1 (a) and module 2 (b) in the same conditions

换用模块 2 后,在相同的腔体条件下未能实现连续稳定锁模,在高功率条件下所得波形如图 4(b)所示,出现了多脉冲现象,主要原因是模块 2 不仅基模小信号增益高于模块 1,而且热效应也更加强烈。根据(1)式的稳定锁模条件,减小了望远镜系统的放大率,增大了输出耦合率,同时改用调制深度为 1.5%的 SAM-1064-3 型 SESAM,实现了 4.5 W 以

上的连续稳定锁模脉冲,继续增大电流并调整,最终实现了接近 7 W 的连续锁模如图 5(b)所示,再次增加电流时出现了多脉冲调制现象。

经过合理的设计,用几种 SESAM 样品同样成功地实现了连续锁模,最终在模块 2 约 100 W 抽运,Z 型折叠腔结构下,采用调制深度约 1%、饱和通量约 $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的国产 SESAM 样品获得了高

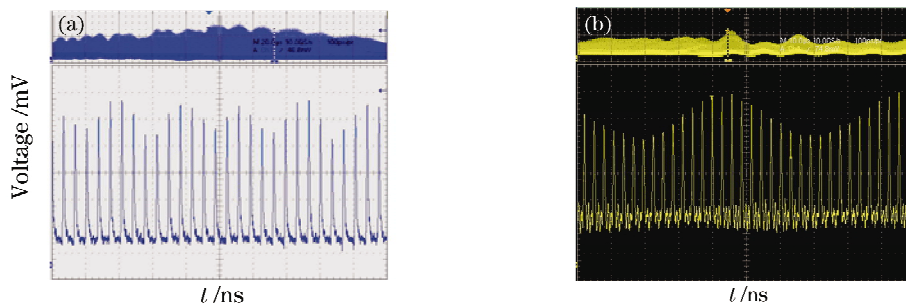


图 5 BATOP 公司 SESAM 实现锁模波形,(a)4.5 W 锁模波形(上: $20 \mu\text{s}/\text{div}$ 及放大(下: $40 \text{ ns}/\text{div}$); (b) 6.64 W 连续锁模激光输出

Fig. 5 Mode-locked pulse waveform with the SESAM from BATOPCO. (a) 4.5 W mode-locked (upper: $20 \mu\text{s}/\text{div}$, lower: $40 \text{ ns}/\text{div}$); (b) 6.64 W output of continuous mode-locked pulse

达 9.45 W 的连续稳定锁模皮秒脉冲序列(图 6)。为实时检测脉冲波形,实验中用 5%的分光镜对输出光束进行了采样,因此实际输出光功率近 10 W,这是目前国内报道 SESAM 被动锁模激光器的最大功率。

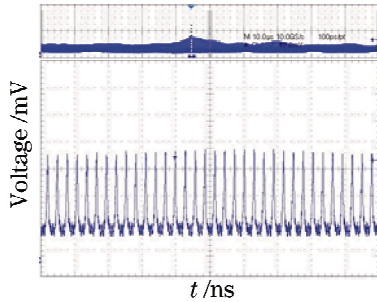


图 6 国产 SESAM 实现锁模波形及放大
(上:10 $\mu\text{s}/\text{div}$,下:50 ns/div)

Fig. 6 Mode-locked pulse waveform with SESAM sample made in china (upper: 10 $\mu\text{s}/\text{div}$; lower: 50 ns/div)

综合分析图 5、图 6,尽管激光器实现了连续锁模,但在 10 $\mu\text{s}/\text{div}$ 尺度上始终存在扰动,影响了激光器的稳定性。从图 5(a)、图 6 均可看出,扰动的幅度无规则,而周期在 15~20 μs ,很可能是激光器自身的噪声导致的弛豫振荡现象。弛豫振荡是激光谐振腔的一种基本特性,激光器内腔模式竞争、光学损耗变化或抽运扰动导致增益改变等原因都可能激发噪声引起弛豫振荡。固体激光器中由于机械振动或热扰动等因素时刻存在,导致的振荡幅度往往是无规则的,但其弛豫频率由谐振腔的增益与损耗决定^[15]。

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{I_s \tau_f \tau_c}}, \quad (2)$$

式中 $\tau_f = 230 \mu\text{s}$ 为 Nd:YAG 介质的上能级寿命, I_s 是介质的饱和光强, I 为腔内光强, τ_c 为光子衰减时间,以图 4 所用腔体为例计算得到弛豫振荡的频率约为 64 kHz,周期约 15.6 μs ,与测量结果相符。

在本实验中,扰动的主要来源有三类:

1) 冷却水冲击等机械振动;

2) 热噪声导致的光程扰动,包括腔长的改变和增益介质的折射率波动。热噪声会导致增益介质的径向折射率改变和轴向长度伸缩,前者影响光束的聚焦效果,导致 SESAM 表面光斑抖动。后者改变腔长,直接影响激光谐振腔的本征模式,进而从根本上影响激光器稳定性;

3) 自发辐射扰动。自发辐射本身就是以噪声形式存在,在激光器起振之后,自发辐射所占的能量份

额会大为减小。

前两种扰动来源可以归因于当前模块的抽运及冷却方式,国外同类激光器^[6]的报道中,增益模块尺寸更小,同时采用金属传导冷却方案,能够实现最佳的机械稳定性和温度均匀性,为进一步提高激光器锁模稳定性提供了参考和借鉴。

5 结 论

采用不同的 LD 侧面抽运模块和 SESAM 进行了被动锁模 Nd:YAG 激光器实验,获得了平均功率达 9.45 W 的连续锁模皮秒脉冲序列。

实验结果验证了稳定锁模阈值条件,说明了小尺寸模块可以具有更高的基模小信号增益、更高的抽运效率和均匀性,从而更容易实现高功率连续稳定锁模。在相同的谐振腔结构中采用光束质量较好,增益较高的小尺寸模块,激光器的光光效率由约 1%改善至约 10%,输出功率也有很大提高。

参 考 文 献

- U. Keller, Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- Yang Junyi, Ma Hongliang, Lu Bo *et al.*. Raman spectroscopy study of phase transformation of TiO₂ rutile single crystal induced by infrared femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1909~1912
杨俊毅,马洪良,鲁波等.飞秒激光诱导二氧化钛金红石单晶相变的拉曼光谱研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1909~1912
- Wu Yinzong, Wang Qingyue, Jia Wei *et al.*. Femtosecond laser fabrication of microholes in photosensitive glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1293~1296
巫殷忠,王清月,贾威等.飞秒激光在光敏玻璃内制作微孔[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1293~1296
- U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7): 505~507
- G. J. Spühler, R. Paschotta, U. Keller *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10 W average power in a diffraction-limited beam [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(8): 528~530
- Chen Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passive 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
- Cai Zhiqiang. *Experimental Research on LD Pumped Passively Continuous-Wave Mode-Locked Lasers with SESAM* [D]. Tianjing: Tianjing University, 2004
蔡志强. LD 抽运的 SESAM 被动连续锁模激光器实验研究[D]. 天津:天津大学, 2004
- Li Liwei, Wang Jiaxian, Wang Juanjuan. Study on passive mode-lock of Nd:YAG laser with SESAM[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, **14**(2): 213~217
李立卫,王加贤,王娟娟. SESAM 实现 Nd:YAG 激光器被动锁模研究及皮秒脉冲测量[J]. *量子光学学报*, 2008, **14**(2): 213~217

- 9 Zhang Bingyuan, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Study on diode-side-pumped mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 59~62
张丙元,陈 檬,李 浩等. 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 59~62
- 10 Gu Qingyuan, Ilou Jing, Cheng Xiang'ai *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 655~659
谷庆元,侯 静,程湘爱等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 655~659
- 11 H. Liu, Y. Sun, S. Zhang *et al.*. 5.1 ps passively mode-locked Nd:GdO₂Y_{0.58}VO₄ laser with a LT-GaAs absorber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 361~363
- 12 Li Xiao, Xu Xiaojun. Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirrors[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(s1): 1~4
李 霄,许晓军. 用半导体可饱和吸收镜实现侧面抽运 Nd:YAG 被动锁模固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 1~4
- 13 U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kratner *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, **2**(3): 435~452
- 14 Li Xiao, Xu Xiaojun, Xi Fengjie *et al.*. Measuring the thermal focal length with a curvature sensor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1431~1435
李 霄,许晓军,习锋杰等. 基于波前曲率传感器的棒状 LD 抽运激光器的热透镜效应测量[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1431~1435
- 15 W. Koechner. *Solid State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002