

# 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

李 霄 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**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、脉冲序列稳定等优点,在许多领域有着重要用途。简述了用半导体可饱和吸收镜锁模固体激光器的具体要求及方案,介绍了采用 Z 型折叠腔结构和大功率侧面抽运模块实现的半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 固体激光器。得到了平均功率为 4.7 W,脉冲重复频率 55 MHz,单脉冲能量 85 nJ 的皮秒激光脉冲,光束质量好, $M^2$  因子约为 1.2,谱线宽度约为 0.1 nm,在小时间尺度上得到较好的锁模效果,对实验现象进行了描述,对实现高功率侧面抽运锁模激光器进行了初步探讨。

**关键词** 激光器; 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

## Passively Mode-Locked Side-Pumped Nd:YAG Laser with Semiconductor saturable Absorption Mirrors

Li xiao Xu xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Semiconductor saturable absorption mirrors (SESAMs) 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 got the highest average output power of about 4.7 W. The single pulse has about 85 nJ energy and 55 MHz repeat frequency. The spectrum is measured and the full wavelength at half maximum (FWHM) is about 0.1 nm, and the  $M^2$  factor is about 1.2. Significantly, with exactly measurement about the thermal focus length, special cavity can be designed to control the mode radius. Although the laser was pumped by high power LDs (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-locking solid laser.

**Key words** lasers; solid-state laser; semiconductor saturable absorption mirrors; mode-lock; side-pumped; picosecond pulse

### 1 引 言

锁模激光器具有高峰值功率,高脉冲重复频率等优点,在激光加工、光纤通信、非线性光学变换等领域有重要用途。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<sup>[1]</sup>。1992年,U. Keller等<sup>[2]</sup>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。半导体可饱和吸收镜锁模激光器与一般的饱和吸收体锁模相比,有插入损耗小、结构简单等优

点,因此自问世以来,半导体可饱和吸收镜锁模固体激光器技术进展很快<sup>[3]</sup>,目前国内主要集中于利用半导体可饱和吸收镜锁模端面抽运固体激光器的研究<sup>[4,5]</sup>,文献<sup>[6]</sup>对用直腔实现侧面抽运锁模运转进行了分析。国外已报道的半导体可饱和吸收镜锁模全固态激光器多采用折叠腔,且大功率的固体激光器多采用侧面抽运结构<sup>[7]</sup>。本文对半导体可饱和吸收镜锁模侧面抽运 Nd:YAG 固体激光器的具体要求及方案进行了讨论,选定 Z 型折叠腔进行实验并

**作者简介:** 李 霄(1983—),男,湖北人,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

得到较好结果。

## 2 稳定锁模条件

文献[3]给出了半导体可饱和吸收镜稳定锁模固体激光器的阈值条件公式为

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

式中  $E_p$  为锁模后腔内单脉冲能量,  $A_L$  为增益介质上光斑面积,  $F_{\text{sat,L}} = h\nu/N\sigma$  为增益介质的有效饱和通量,  $h\nu$  为光子能量,  $N$  为光在腔内往返一次经过增益次数, 对于一般驻波腔  $N = 2$ ,  $\sigma$  为增益介质散射截面积,  $\Delta R$  为调制深度.  $F_{\text{sat,A}}$  是半导体可饱和吸收镜的饱和通量. 因此, 锁模的关键在于选择适当的半导体可饱和吸收镜和增益介质, 并设计能有效控制半导体可饱和吸收镜及激光棒表面的光斑面积的腔体以使半导体可饱和吸收镜适当地饱和。

实验采用 BATOP 公司的 SAM-1064-1 型的半导体可饱和吸收镜, 工作波长为 1064 nm,  $F_{\text{sat,A}} = 90 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ , 恢复时间  $\tau < 10 \text{ ps}$ . 调制深度  $\Delta R$  为 0.5%, 破坏阈值为  $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . 所用激光模块为百瓦级大功率模块, Nd:YAG 激光棒直径 5 mm, 长 126 mm, 周围有 5 组激光二极管侧面环绕抽运, 实际工作时抽运光功率为 250~800 W, 通水冷却。该

模块热透镜效应很强, 在分析腔内光斑时必须对棒的热透镜等效焦距进行精确的测量和补偿<sup>[8,9]</sup>。

经过调研和实验, 选定了图 1 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, 改变半导体可饱和吸收镜或激光棒位置, 可实现对其表面光斑大小的有效调节便于产生锁模脉冲。而且可以方便地改变腔镜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。

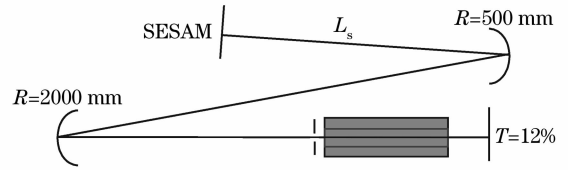


图 1 激光器腔体示意图

Fig. 1 Schematic of the laser cavity

根据文献[9]对该模块的热透镜效应测量结果, 建立谐振腔往返矩阵分析半导体可饱和吸收镜表面光斑半径  $\omega_s$  及激光棒表面光斑半径  $\omega_L$  随臂长  $L_s$  变化如图 2 所示。激光棒表面光斑半径为 0.3~0.4 mm, 因此采用直径 1 mm 的小孔在棒端限模, 可以得到很好效果。

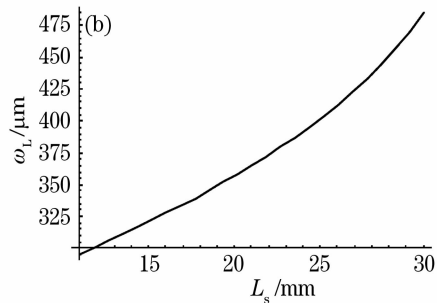
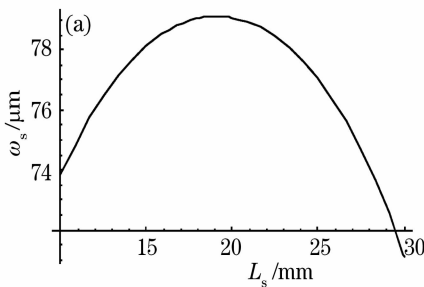


图 2 22 A 抽运时半导体可饱和吸收镜(a)及激光棒(b)表面光斑半径随臂长  $L_s$  变化  
Fig. 2 Relation between the  $L_s$  and the mode radius on SESAM (a) and laser rod (b)

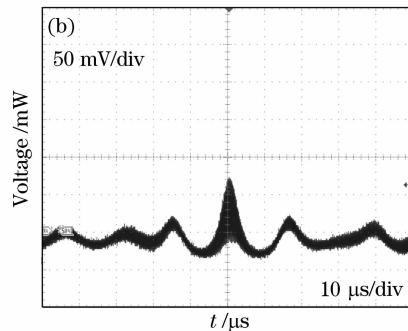
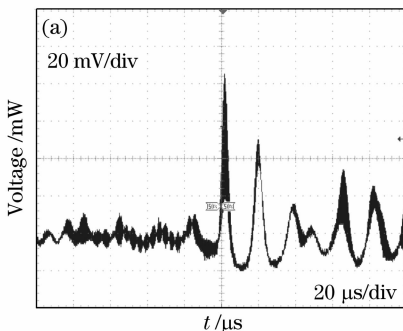


图 3 不同功率下的脉冲波形。(a) 0.5 W, (b) 1 W

Fig. 3 Pulse under different powers. (a) 0.5 W, (b) 1 W

### 3 实验结果

微调腔体,在 16 A 电流条件下得到了约 0.5 W 输出功率,此时在示波器 20  $\mu\text{s}/\text{div}$  的尺度上可以看到因被动调 Q 产生的无规则脉冲如图 3(a) 所示。在 10 ns/div 尺度上可以观测到不稳定的脉冲,脉冲间隔为 18 ns 与腔长符合,但每个脉冲由多个小峰组成。

改变半导体可饱和吸收镜的位置,使其表面光斑面积减小,平均功率密度提高,同时升高抽运电流,可以观测到不稳定的调 Q 锁模状态,如图 3(b) 所示,随着电流的提升,调 Q 包络的深度减小,脉冲也变得稳定继续升高抽运电流,在 23 A 时调节得到最高输出功率 4.7 W,已经得到稳定的连续锁模脉

冲,为防止高电流影响棒的使用寿命,没有进一步提高电流。

如图 4(a) 所示,可以观测到脉冲包络整体存在无规则起伏,其原因很可能是热扰动。在更大时间尺度上扰动更为剧烈,影响了激光器工作的稳定性,若能采用其他手段进一步精确补偿热效应<sup>[10]</sup>,激光器的性能会有较大提升。

测量输出的激光光斑如图 5(a) 所示,光斑均为均匀高斯分布。采用一 15 cm 焦距的短焦透镜聚焦,根据其焦点附近的光斑大小变化用二次曲线拟合法计算得到  $M^2$  因子约 1.2。用光谱仪测量激光的谱线宽度如图 5(b) 所示,半峰全宽(FWHM)约为 0.1 nm。

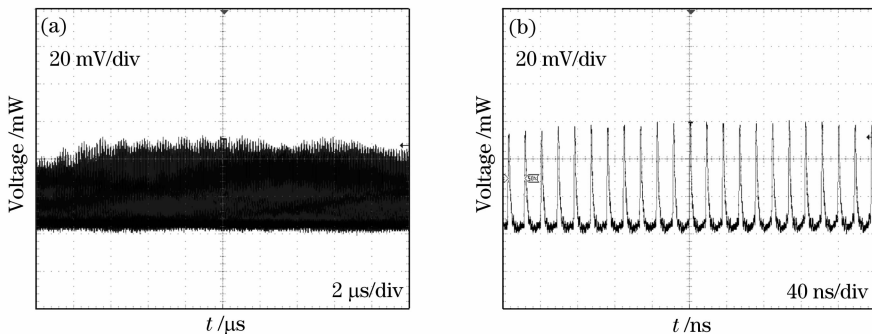


图 4 稳定锁模输出时的脉冲形态

Fig. 4 Continuous mode-locking pulse

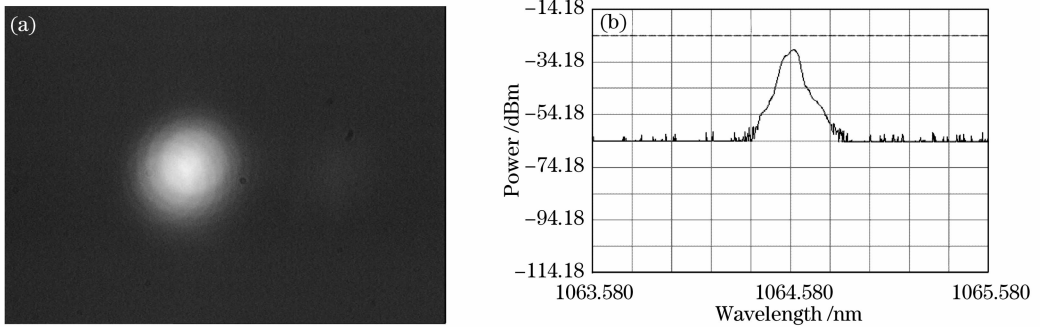


图 5 输出光斑(a) (CCD 采样图)及谱线图 (b)

Fig. 5 (a) Beam spot on the CCD, (b) spectrum of the laser

### 4 结 论

在研究半导体可饱和吸收镜被动锁模固体激光器理论后,采用 ABCD 矩阵分析谐振腔体的方法、研制了一台半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 固体皮秒激光器,得到了 4.7 W 的较高功率输出,锁模现象明显,光束质量好。在实验中发现激光器存在扰动,影响锁模效果,其原因是腔内实际基模直径在 1 mm 内,而大功率侧面抽运固体激光器棒直

径 5 mm,80% 以上增益区的能量以废热和自发辐射形式耗散,伴随的热噪声等扰动在腔内弛豫,影响了激光器的稳定性。因此,采用合理的腔体设计充分利用增益区同时对激光器热效应做进一步精确补偿是实现更大功率侧面抽运锁模固体激光器的关键。

### 参 考 文 献

- 1 Ursula Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831~838

- 2 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
- 3 U. Keller, Kurt J. Weingarten, Franz X. Kartner *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
- 4 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
- 5 Cai Zhiqiang. Experimental research on LD pumped passively continuous-wave mode-locked lasers with SESAM[D]. Tianjing: Tianjin University, 2004  
蔡志强. LD 泵浦的 SESAM 被动连续锁模激光器实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2004
- 6 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 港等. 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
- 7 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
- 8 Wang Sa, Liu chong, Chen Jun *et al.*. Influence of resonator structure of solid-state laser on thermal focal length measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1431~1435  
汪 莎,刘 崇,陈 军等. 固体激光器腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1431~1435
- 9 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**(9): 1465~1468  
李 霄,许晓军,习锋杰等. 采用曲率传感器测量热透镜焦距[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(9): 1465~1468
- 10 Li Jie, Chen Haiqing, Yu Hongbing. Study of deformable mirror for compensating the thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1198~1202  
李 捷,陈海清,余洪斌. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的微变形镜特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1198~1202