

文章编号: 0253-2239(2005)01-59-4

# 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究\*

张丙元<sup>1,2</sup> 陈 檬<sup>1</sup> 李 港<sup>1</sup> 郭晓萍<sup>1</sup> 于海娟<sup>1</sup> 宋海平<sup>1</sup> 王勇刚<sup>3</sup>

1 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022  
2 聊城大学物理科学与信息工程学院, 聊城 252059  
3 中国科学院半导体研究所, 北京 100081

**摘要:** 利用谐振腔的稳定条件对激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 锁模直腔的稳区特性和谐振腔内的光斑分布进行了分析。根据对腔参量的分析, 选取合适的腔参量设计了一个简单的侧面抽运直腔, 该谐振腔腔形简单, 没有像散, 振荡光模式好, 有利于激光器的锁模运转。实验中采用国内自行研制的半导体可饱和吸收镜, 实现了激光二极管侧面抽运半导体可饱和吸收镜锁模 Nd:YAG 激光器的连续锁模运转, 平均输出功率为 2 W, 锁模脉冲宽度为 10 ps, 重复频率为 100 MHz。结合实验结果进一步讨论了半导体可饱和吸收镜的一些参量如饱和和恢复时间、调制深度等对实现稳定连续锁模的影响。

**关键词:** 激光器; 固体激光器; 被动锁模; 激光二极管侧面抽运; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Study on Diode-Side-Pumped Mode-Locked Laser with Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Zhang Bingyuan<sup>1,2</sup> Chen Meng<sup>1</sup> Li Gang<sup>1</sup> Guo Xiaoping<sup>1</sup>

Yu Haijuan<sup>1</sup> Song Haiping<sup>1</sup> Wang Yonggang<sup>3</sup>

1 College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022  
2 School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059  
3 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** The characteristics of diode-side-pumped linear resonator were discussed in the stable condition of the laser resonator. Based on the analyses of the resonator, a simple linear resonator was designed, which was favorable for the mode-locking with good laser mode and without astigmatism. In the experiment, the homemade semiconductor saturable absorber mirror was employed for passive mode-locking. Stable continuous-wave mode locking was achieved at 100 MHz repetition rate with 10 ps of pulse duration and the average output power was 2 W. Furthermore, the effects of the parameters of SESAM for the mode-locking were discussed.

**Key words:** lasers; solid-state laser; passive mode-locking; diode-side-pumped; semiconductor saturable absorber mirror

## 1 引 言

全固态被动锁模激光器在非线形频率变换、光通信等领域有着广泛的应用。随着半导体外延技术的发展与成熟, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 已成为锁模激光器中理想的锁模元件。它作为一种有效

的自启动锁模元件, 国外已经在激光二极管抽运的 Nd:YAG/YVO<sub>4</sub>/YLF 激光器中实现了皮秒锁模输出<sup>[1~7]</sup>。半导体可饱和吸收镜的应用有效地促进了锁模激光器的全固化和小型化。然而国内由于受限于半导体可饱和吸收镜的来源, 对这方面的研究较少。我们同中国科学院半导体研究所合作, 利用自

\* 北京市自然科学基金 (3021001) 资助课题。

作者简介: 张丙元 (1974~), 男, 山东聊城人, 讲师, 在读硕士, 主要从事超短脉冲激光技术方面的研究工作。

E-mail: zhangbingyuan@sina.com.cn.

收稿日期: 2003-11-10; 收到修改稿日期: 2004-02-23

行研制的半导体可饱和吸收镜,已经成功地在激光二极管端面抽运的 Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器中实现了连续稳定的被动锁模输出<sup>[7,8]</sup>。为了能够实现大功率的锁模激光输出,我们对激光二极管侧面抽运的激光器进行了研究,获得了平均输出功率为2 W,脉冲宽度为10 ps的锁模脉冲的输出。

国外已报道的全固态激光器半导体可饱和吸收镜锁模运转,均采用折叠腔<sup>[1~5]</sup>,需要进行像散补偿。本文对激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 激光器直腔进行了稳区特性分析。在此基础上,选择合适的腔参量,进行了一系列实验,实现了激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器直腔半导体可饱和吸收镜锁模运转。为进一步研究大功率半导体可饱和吸收镜锁模激光器奠定了基础。

## 2 谐振腔特性分析和数值计算

图1为激光二极管侧面抽运半导体可饱和吸收镜锁模Nd:YAG激光器示意图,晶体的两端面镀1064 nm的增透膜,L为凸透镜,f为透镜的焦距,两

端面镀1064 nm的增透膜。腔长为150 cm,输出镜M<sub>1</sub>选用透射率为12%的平面镜。半导体可饱和吸收镜包括一个12 nm厚的In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As量子阱,生长温度是500 °C,反射率为96%。L<sub>c</sub>为激光晶体的几何长度,实验中所用Nd:YAG的尺寸为φ3 mm×75 mm。L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>分别代表晶体前端面与输出镜的距离、晶体后端面与透镜L的距离、透镜L与半导体可饱和吸收镜的距离。(1)式中n为晶体的折射率。

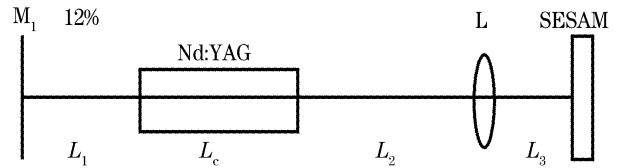


图1 半导体侧面抽运半导体饱和吸收镜锁模 Nd:YAG 激光器示意图

Fig.1 Schematic of the diode-side-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser

半导体可饱和吸收镜锁模与入射到半导体可饱和吸收镜上的能量密度有关,即与腔内功率和半导体可饱和吸收镜上的光斑大小 $\omega$ 有关。

利用谐振腔的往返矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_c/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_c/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_c/2n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

并根据稳定性条件

$$\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1, \quad (2)$$

找出谐振腔的稳区,同时可求出半导体可饱和吸收镜上的光斑半径 $\omega$

$$\omega^2 = \frac{\lambda |B|}{\pi \sqrt{1 - [(A+D)/2]^2}}. \quad (3)$$

根据上述原则,用计算机处理有关数据,即可画出半导体可饱和吸收镜上光斑大小 $\omega$ 随各参量(L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub>,L<sub>3</sub>,f和f<sub>r</sub>)的变化曲线,而 $\omega$ 对应的横坐标的变化范围即为稳区范围。其中参量f<sub>r</sub>为晶体的热焦距,这是由于大功率抽运时激光晶体会产生热透镜效应。不同的抽运功率对应不同的热焦距,利用He-Ne测得当抽运功率P<sub>in</sub>=90 W时,f<sub>r</sub>≈650 mm。

数值计算结果见图2和图3。图2(a)是f=20 mm,40 mm,60 mm时, $\omega$ 随L<sub>2</sub>的变化曲线,其它腔参量为L<sub>1</sub>=200 mm,f<sub>r</sub>=650 mm。可以看出,不同的f对应的稳区范围即L<sub>2</sub>的变化范围不同,f

越大,相应的稳区范围越大。在稳区内,L<sub>2</sub>的取值对半导体可饱和吸收镜上光斑半径 $\omega$ 以及稳区影响较大,因此适当选取L<sub>2</sub>对于 $\omega$ 的大小是很重要的。图2(b)是f=20 mm,40 mm,60 mm时, $\omega$ 随L<sub>1</sub>的变化曲线,其它腔参量为L<sub>2</sub>=630 mm,f<sub>r</sub>=650 mm。可以看出, $\omega$ 随L<sub>1</sub>的变化比较缓慢,即L<sub>1</sub>对光斑影响可忽略。通过改变的L<sub>1</sub>大小可以改变锁模脉冲的重复频率。图2(c)是f=20 mm,40 mm,60 mm时, $\omega$ 随L<sub>3</sub>的变化曲线。其它参量为L<sub>1</sub>=200 mm,f<sub>r</sub>=650 mm,L<sub>2</sub>=630 mm。可以看出,当f较大时相应的稳区范围增大,这一点由高斯光束的特性不难知道。图3为f<sub>r</sub>=400 mm,600 mm,800 mm时, $\omega$ 随L<sub>2</sub>的变化曲线,其它腔参量为L<sub>1</sub>=200 mm,f=60 mm。可以看出,对应不同的热焦距,有不同的稳区;热焦距的变化对每一个稳区的大小没有影响,针对不同的热焦距,即不同的抽运功率,可以设计不同的腔参量。

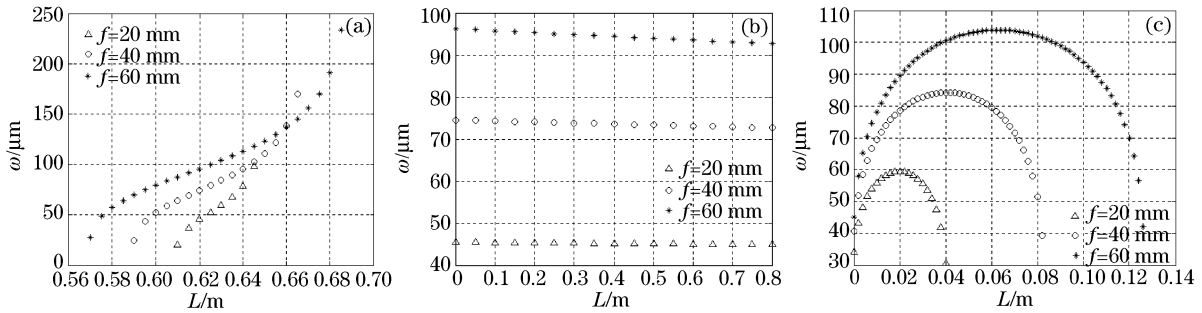


图 2 半导体饱和吸收镜上光斑半径  $\omega$  随 (a)  $L_2$ , (b)  $L_1$ , (c)  $L_3$  的变化曲线

Fig. 2 Variation of radius of the spot on SESAM with (a)  $L_2$ , (b)  $L_1$ , (c)  $L_3$

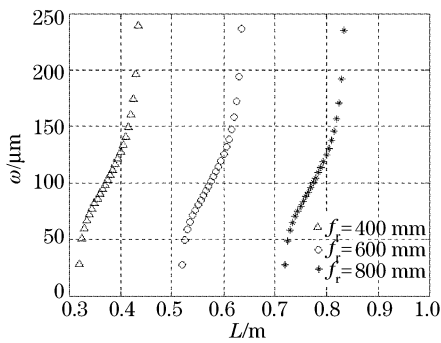


图 3 热焦距对腔稳区的影响

Fig. 3 Variation of steady section cavity with thermal focal length

### 3 实验研究及结果

采用图 1 的实验装置,根据上面的数值计算,对稳区范围进行了一系列实验。在  $L_1=800$  mm,  $L_2=630$  mm,  $f=60$  mm 时,仔细调节谐振腔各器件,使之达到最佳状态。在输入功率为 90 W 时,获得平均功率为 2 W 的连续锁模输出,重复频率为 100 MHz,并可长时间维持连续锁模,锁模波形见图 4。利用型号为 FR-103XL 的 Femtochrome 非共线二次谐波自相关仪。测量了锁模脉冲的脉宽。

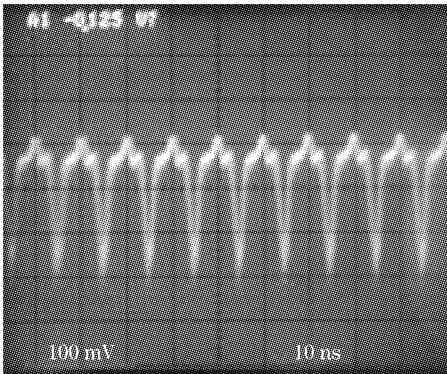
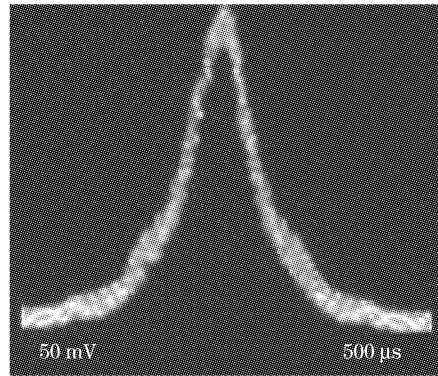


图 4 连续锁模脉冲序列

Fig. 4 Oscilloscope trace of CW mode-locked pulses

图 5 为用 Tek 400 MHz 示波器记录下来的自相关曲线,其半峰全宽为  $\Delta t=440$   $\mu$ s。锁模脉冲宽度为:  $\tau=\Delta t \times \alpha \times 32$ ,  $\alpha$  是波形系数,按高斯函数确定,即  $\alpha=0.707$ 。根据上述公式计算得,锁模脉宽  $\tau=10$  ps。



连续锁模脉冲的自相关曲线

Fig. 5 Autocorrelation of diode-side-pumped CW mode-locked Nd:YAG laser

抑制自调 Q 现象的产生是利用半导体可饱和吸收镜作为锁模器件的全固化锁模激光器的一个重要问题。自调 Q 不存在的条件由下式表示<sup>[5]</sup>:

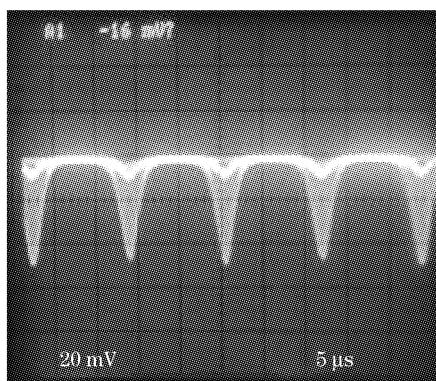
$$P \left| \frac{dq}{dp} \right| < \frac{g_0}{g} \frac{T_R}{\tau}, \quad (4)$$

$P$  是腔内的能量,  $T_R$  是腔内的往返时间,  $\tau$  是增益介质的上能级寿命,  $q$  是单程饱和和损耗,  $g_0$  是单程小信号增益系数,  $g$  是单程饱和增益系数(在稳定状态下等于单程损耗)。从上式可以看出,短的增益介质的上能级寿命,低的单程损耗,高的小信号增益以及长的谐振腔有利于抑制自调 Q 而实现稳定的连续锁模。实验中,采取以下几个措施来抑制自调 Q 的产生。(1) 在设计腔时,使增益介质中的光斑半径较小来增大增益。(2) 采用低调制深度,饱和恢复时间短的半导体可饱和吸收镜。(3) 采用小焦距透镜以保证在半导体可饱和吸收镜获得足够的饱和光强。

实验过程中,我们采用的半导体可饱和吸收镜

包括一个 12 nm 厚的  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  量子阱,生长温度是 500 °C,反射率为 96%。半导体可饱和吸收镜锁模阈值与半导体可饱和吸收镜的饱和光强有关。通常情况下,谐振腔内的功率密度达到饱和光强的 4~5 倍时,半导体可饱和吸收镜被动锁模即会产生。实验中通过改变图 1 中的透镜  $L$  的焦距以及调节  $L_3$  大小,来改变入射到半导体可饱和吸收镜上的光功率密度。根据所有的锁模理论,脉冲宽度与可饱和吸收镜的调制深度成反比。深度调制可获得更短的脉冲,同时可以缓和自启动的要求,并不是越深越好,深度调制往往带来过大的非饱和损耗,调制深度的上限是自调 Q 现象的发生。实验过程中,通过改变半导体可饱和吸收镜的反射率来调节其调制深度。

半导体可饱和吸收镜被动锁模产生的锁模脉冲宽度(FWHM)及锁模的稳定性,主要由两个因素决定:一是半导体可饱和吸收镜的饱和恢复时间(带内热平衡时间和带间跃迁时间);二是激光器的增益带宽。实验所用的半导体可饱和吸收镜,经抽运-探针法测量其饱和恢复时间小于 1 ps;对于 Nd:YAG 激光晶体,理论上的锁模极限脉宽为 2 ps。在皮秒激光系统中,锁模脉冲宽度取决于带间跃迁时间。实验中发现半导体可饱和吸收镜的带间跃迁时间过长,容易引起自调 Q 锁模(图 6),会破坏连续锁模的稳定性。



自调 Q 锁模脉冲包络

Fig. 6 Oscilloscope trace of self Q-switched mode-locked pulses

## 4 结 论

综上所述,在设计腔参量时, $L_1$  的可变范围非

常大并且对  $\omega$  的影响很小,可以不予考虑; $L_2$  的取值对腔的稳区影响较大,而  $f$  对半导体可饱和吸收镜上的光斑大小  $\omega$  影响非常大,应着重考虑。因此在确定参量时应综合考虑各参量的稳区范围及它们对  $\omega$  的影响,在保证半导体可饱和吸收镜上光斑大小合适(不同的半导体可饱和吸收镜的饱和强度和损坏阈值不同,要根据抽运功率和所用半导体可饱和吸收镜合理设计谐振腔)的情况下,尽量使稳区范围大,以利于实验调节。

本文对激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 直腔进行了稳区特性分析,根据对腔参量的分析结果,设计了一个简单的侧抽运直腔,进行了一系列实验,所测得的稳区范围与上述数值计算基本符合,证明了该数值分析方法是可行的。利用国内自行研制的半导体可饱和吸收镜(半导体可饱和吸收镜),实现了激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器稳定的连续锁模输出,平均功率 2 W,脉冲宽度为 10 ps。并讨论了半导体可饱和吸收镜的一些参量对锁模的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Keller U. Ultrafast all-solid-state laser technology[J]. *J. Appl. Phys. (B)*, 1994, **58**:347~363
- 2 Keller U, Miller D A B, Boyd G D. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 505~507
- 3 Major A, Langford N, Graf T *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser with 1-W average output power[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1478~1480
- 4 Graf T, Ferguson A I, Bente E. Multi-watt Nd:YVO<sub>4</sub> laser, mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror and side-pumped by a diode-laser bar[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**: 84~87
- 5 Burns D, Hetterich M, Erguson A I. High-average-power (>20-W) Nd:YVO<sub>4</sub> lasers mode locked by strain-compensated saturable Bragg reflectors[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2000, **17**(6): 919~926
- 6 Ju Guifang, Chai Lu, Wang Qingyue. Stable mode locking in a Yb:YAG laser with a fast[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 695~696
- 7 Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan. Semiconductor saturable absorber mirror for self starting mode locked Ti:sapphire lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1151~1152 (in Chinese)  
张志刚,柴路,赵江山等.用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1151~1151
- 8 Zhang Bingyuan, Li Gang, Chen Meng. Passive mode-locking of diode-end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1829~1831
- 9 Zhang Bingyuan, Li Gang, Chen Meng. Comparative study of the mode-locking of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YAG lasers with semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8): 477~479