

文章编号: 0258-7025(2004)06-0646-03

半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究

陈 檬¹, 张丙元^{1,2}, 李 港¹, 王勇刚³

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, 山东 聊城 252059; ³ 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 利用自行研制的半导体可饱和吸收镜(SESAM),在 5 W 光纤耦合半导体激光器端面抽运的 Nd:YAG 激光中,实现了半导体可饱和吸收镜被动锁模,获得了稳定的皮秒锁模激光输出。经自相关仪测量,其锁模激光脉冲宽度小于 10 ps。实验采用直腔结构的谐振腔,该腔结构简单,易于调整,实现可饱和半导体吸收镜稳定锁模时,光-光转换效率达到 19%。

关键词 激光技术;Nd:YAG 激光器;半导体可饱和吸收镜;被动锁模;激光二极管抽运

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Study on SESAM Passively-Mode-Locked Nd:YAG Laser

CHEN Meng¹, ZHANG Bing-yuan^{1,2}, LI Gang¹, WANG Yong-gang³

¹ The College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

² The College of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

³ Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract A high-efficiency and stable ps mode-locked Nd:YAG laser that used a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is reported. This SESAM is made by ourselves. The mode-locked pulse duration is narrower than 10 ps, measured by autocorrelation. The optical-optical conversion efficiency of 19% with straight cavity is attained.

Key words laser technique; Nd:YAG laser; semiconductor saturable absorber mirror (SESAM); passively mode-locked; diode pumped

1 引 言

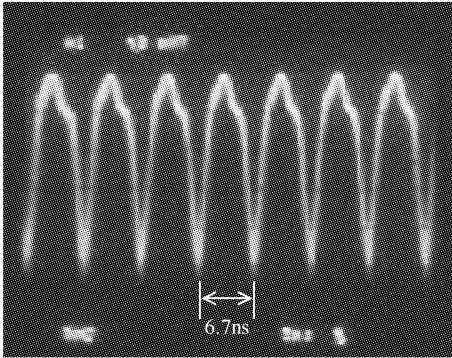
随着半导体外延技术的发展与成熟,半导体可饱和吸收镜(SESAM)成为当今锁模激光器中最理想的锁模元件。半导体可饱和吸收镜作为自启动锁模元件,被广泛地用在各种克尔透镜锁模激光器中^[1~4]。半导体可饱和吸收镜与其他锁模元件相比,它的结构简单并且稳定可靠,大大简化了克尔透镜锁模激光器的内部结构,增加了其实用性,从而使超短激光脉冲得到了更广泛的应用和飞速发展。

近年来国外利用半导体可饱和吸收镜被动锁模特性,在半导体抽运的多种 Nd³⁺ 激光器中实现了皮秒锁模激光脉冲输出^[5,6]。这种全固态皮秒半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器具有许多应用领域,例如:光谱学、荧光检测、非线性频率变换、光通信、人造卫星激光测距等。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。我们利用自行研制的半导体可饱和吸收镜,成功地在激光二极管(LD)抽运的 Nd:YAG/YVO₄ 中实现了连续稳定的被动锁模激光,其锁模波形见图 1。

收稿日期:2003-03-24;收到修改稿日期:2003-05-16

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(编号:3021001)资助课题。

作者简介:陈 檬(1963—),女,北京工业大学激光工程研究院副研究员,硕士,主要从事固体激光器及其技术的研究工作。E-mail:chenmeng@bjut.edu.cn

图 1 锁模波形图(锁模重复频率 $f = 149$ MHz)Fig. 1 Diagram of the mode-locked waveform
(mode-locked frequency $f = 149$ MHz)

2 半导体可饱和吸收镜被动锁模特性

半导体可饱和吸收镜的饱和通量 F_{sat} , 饱和光强 I_{sat} 以及饱和恢复时间 τ_A , 决定了半导体可饱和吸收镜被动锁模特性。

饱和通量 F_{sat} 定义为

$$F_{\text{sat}} = \frac{h\nu}{2\sigma_A} \quad (1)$$

$h\nu$ 为光子能量; σ_A 为吸收截面, 它由半导体可饱和吸收镜的生长温度、吸收区厚度所决定。饱和通量 (F_{sat}) 的大小, 影响半导体可饱和吸收镜实现被动锁模的阈值。

饱和光强 I_{sat} 表示为

$$I_{\text{sat}} = \frac{h\nu}{2\sigma_A\tau_A} = \frac{F_{\text{sat}}}{\tau_A} \quad (2)$$

τ_A 的长短影响半导体可饱和吸收镜被动锁模的脉宽。一般来说, 生长温度越低, 饱和恢复时间 (τ_A) 越短。但是低温生长会产生缺陷, 因此合理控制半导体可饱和吸收镜的生长温度, 是决定其质量的一个重要因素。

3 实验装置

图 2 为实验中采用的激光二极管端面抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器光路示意图。抽运源激光二极管输出功率为 5 W, 通过芯径 400 μm 的光纤束耦合输出; F_1, F_2 为准直聚焦透镜; 激光晶体为 Nd:YAG, 尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 为避免标准具效应, 其中一端带一小楔角; M_1 为全反镜, M_2 为输出镜; F_3 是为补偿腔内热透镜而设计的补偿透镜; F_4 为一聚焦透镜。谐振腔腔长(从 M_1 到半导体可饱和吸收镜)1 m 左右。

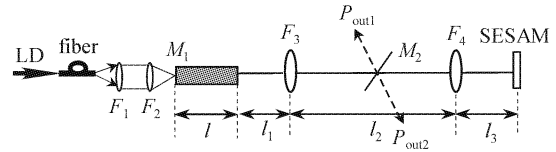


图 2 激光二极管抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模激光实验示意图

Fig. 2 Experimental laser setup for the passively mode-locked Nd:YAG laser with SESAM

通过改变 F_4 的焦距, 可以改变入射到半导体可饱和吸收镜上的光功率密度; 通过改变输出镜 M_2 的入射角度, 来改变输出/透过比率, 以获得最佳透过率。经实验测定, 在上述这套装置中, 最佳透过率为 7%。

半导体可饱和吸收镜采用低温 (500 $^{\circ}\text{C}$) 单量子阱结构的半导体可饱和吸收镜, 吸收区厚 12 nm, 反射率 96%。

4 实验数据与分析

4.1 半导体可饱和吸收镜的锁模阈值

如前所述, 半导体可饱和吸收镜锁模阈值与它的饱和光强 (I_{sat}) 有关。通常情况下, 当谐振腔内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(连续)即会产生。

通过改变 F_4 透镜的焦距(参见图 2), 测量了激光二极管抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模激光器达到锁模阈值时的抽运功率和输出功率, 并根据腔内光束传输矩阵, 计算了不同 F_4 时半导体可饱和吸收镜上的光斑尺寸 (w_{SESAM}) 和功率密度, 见表 1。

表 1 阈值功率及其功率密度

Table 1 Power threshold and power density

	F_4		
	22 mm	60 mm	100 mm
	$(w_{\text{SESAM}} = (w_{\text{SESAM}} = (w_{\text{SESAM}} =$		
	7.6 μm) 20.6 μm) 33.4 μm)		
Pump power /W	1.49	1.00	0.83
Output power (P_{out1} + P_{out2}) /mW	50	30	40
Power density of SESAM /(W/cm^2)	3.9×10^5	3.2×10^4	1.6×10^4

半导体可饱和吸收镜上功率密度是按输出透过率 7% 计算的。

根据实验结果,估算出此半导体可饱和吸收镜的饱和光强 (I_{sat}) 约为 $4 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。

4.2 半导体可饱和吸收镜被动锁模脉宽

半导体可饱和吸收镜被动锁模产生的锁模脉冲宽度(FWHM),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;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 。

利用型号为 FR-103XL 的 Femtochrome 非共线二次谐波自相关仪,测量了激光二极管抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模脉冲(见图 1)的脉宽。图 3 为用 Tek400 MHz 示波器记录下来的自相关曲线,其半高宽为: $\Delta t = 400 \mu\text{s}$ 。根据 FR-103XL 自相关仪给出的计算关系式

$$\tau = \Delta t \times 32 (\text{ps/ms}) \times \alpha \quad (3)$$

其中, τ 为被测锁模脉冲的脉宽, $32 (\text{ps/ms})$ 为 FR-103XL 自相关仪给出的比例系数, α 为波形系数。实验中激光模式近似为基横模,因此波形系数按高斯函数确定,即 $\alpha = 0.707$ 。

根据公式(3)计算得,锁模脉宽 $\tau = 9 \text{ ps}$ 。

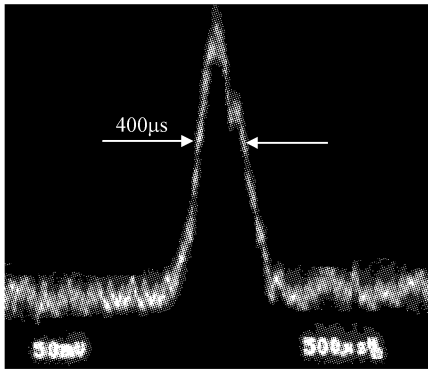


图 3 激光二极管抽运 Nd:YAG 半导体可饱和吸收镜锁模脉冲自相关曲线(半高宽 $\Delta t = 400 \mu\text{s}$)

Fig. 3 Autocorrelation trace of LD pumped Nd:YAG SESAM CW mode-locked (FWHM $\Delta t = 400 \mu\text{s}$)

4.3 半导体可饱和吸收镜锁模脉冲稳定性

锁模稳定性是锁模激光器的重要指标。实验中通过示波器显示的锁模波形(图 1)来监测锁模脉冲的波动,由此测得半导体可饱和吸收镜锁模稳定性可达到 $\pm 2\%$ 。连续观测 4 h ,未出现失锁现象,锁模波形及其稳定性基本不变。

4.4 转换效率

图 4 为锁模输出功率随抽运功率的变化曲线,光-光转换效率达到了 19% 。

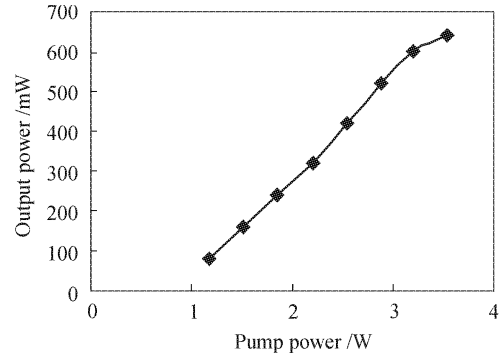


图 4 锁模输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Curve of output power at different pump power

5 结 论

实验表明半导体可饱和吸收镜是实现皮秒锁模激光非常有效的方法,它具有结构简单、成本低、锁模稳定等优点,是实现全固态皮秒锁模激光器产品的有利保证。我们将进一步优化半导体可饱和吸收镜参数,并对于在大功率抽运下,其抗损坏阈值做进一步的研究实验。

参 考 文 献

- 1 C. Hönninger, F. Morier-Genoud, M. Moser *et al.*. Efficient and tunable diode-pumped femtosecond Yb: glass lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2):126~128
- 2 Jie Jiang, T. Hasama, Zhigang Zhang *et al.*. 1. 25-MW peak-power Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser with a broadband semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**:159~163
- 3 A. Robertson, U. Ernst, R. Knappe *et al.*. Prismless diode-pumped mode-locked femtosecond Cr: LiSAF laser [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**:38~43
- 4 Pei 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
- 5 G. J. Spuhler, R. Paschotta, U. Keller *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average power in diffraction-limited beam [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(8):528~530
- 6 Y. F. Chen, S. W. Tsai, Y. P. Lan *et al.*. Diode-end-pumped passively mode-locked high-power Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(4):199~201