

# 半导体激光侧面泵浦主动锁模 Nd : YAG 激光器 \*

陈有明 周复正 胡文涛 李植森 鄢 雨

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**摘要** 报道了用调制频率为 48 MHz 的调幅锁模调制器实现准连续 60 W 半导体激光侧面泵浦 Nd : YAG 激光器的锁模, 锁模脉冲宽度为 120 ps。实验中观察到自锁模现象, 并对此作了分析。

**关键词** 半导体激光泵浦, 主动锁模, 自锁模

## 1 引言

锁模的固体激光器是一种重要的短脉冲相干光源, 多年来一直被广泛用于高功率激光系统的主振荡器和其它超短脉冲激光器的泵浦光源。大多数闪光灯泵浦声光振幅调制的锁模 Nd : YAG 激光器, 所产生的锁模脉冲宽度一般在 80~200 ps<sup>[1]</sup>。大功率半导体激光器的出现, 为固体激光器提供了优良的泵浦光源。泵浦光源的单色性好, 热负载小, 耦合效率高是获得优质锁模脉冲的重要条件, 而半导体激光器作为泵浦光源完全具备上述条件。因此在 80 年代末, 人们纷纷开展半导体激光泵浦的锁模激光器研究, 并获得了近带宽极限和小于理论计算值宽度的锁模脉冲<sup>[2,3]</sup>。在这些锁模研究中大多采用的是高频(一般在 100 MHz 以上)调幅或调频的调制器。为了进一步认识半导体激光作为泵浦光源的优越性。我们用调制频率仅为 48MHz 的调幅锁模调制器进行了实验, 获得了宽度(FWHM)为 120 ps 的锁模脉冲的激光输出。

## 2 锁模激光器描述

半导体激光侧面泵浦的 Nd : YAG 主动锁模激光器的结构如图 1 所示, 激光增益介质掺杂浓度为 1.1 wt-%, 为了匹配半导体激光器的有效发射区域, 该晶体的长、宽、高设计加工成 16.2×2×3 mm<sup>3</sup>, 两端面平行加工成布鲁斯特角, 这样既可增加有效增益长度, 又可消除光学反馈造成的标准具效应, 泵浦源为准连续 60 W 的半导体激光阵列, 发光元几何尺寸为 10 mm × 1 μm, 通过控制温度, 使其发射波长在 808 nm Nd : YAG 的主吸收峰上, 采用直接耦合方式, 为增加增益介质有效吸收长度, 在 Nd : YAG 晶体的另一侧面置一块 808 nm 的全反射镜。

调幅调制器的声光介质为熔融石英, 两端面小角度平行切割以减小光反馈量, 晶体长度为 20 mm, 通光口径为 6×6 mm<sup>2</sup>, 换能器是 36° Y 切割的铌酸锂晶体, 当光线平行于声波波面入

\* 本研究工作得到院军工的资助。

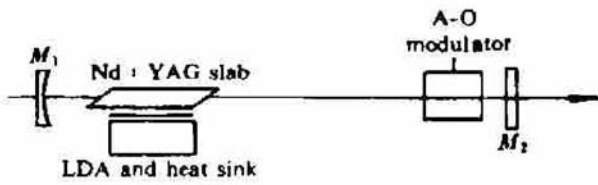


Fig. 1 Schematic of the active mode-locked Nd:YAG laser side-pumped by a laser-diode-array

射时,产生拉曼-奈斯特衍射,最大驱动功率为连续 1 W,调制频率为 48 MHz。

为了与声光调制器的调制频率匹配,激光器的腔长设计为 1.5 m,这样谐振腔的非涅耳数只有 0.626,腔模的衍射损耗大。然而激光器的增益长度和激活区域,与闪光灯泵浦的相比小得多。因而我们选用曲率半径分别为 1.6 m 和 2 m 的

腔片作为谐振腔的前后腔镜。这样谐振腔的  $g$  因子( $g = g_1 \times g_2$ )只有 0.016,并满足稳定条件,即  $|A + D| < 2$  ( $A, D$  为 ABCD 传输矩阵对角元),使衍射损耗尽可能小。

用快速响应的强流管探测器监视锁模状态,宽带存储示波器记录锁模序列波形。用分辨率为 10 ps 的条纹相机测量锁模脉冲宽度,用定标的自制快速响应的能量探测器测量脉冲能量。

### 3 实验结果

首先我们进行激光器静态实验,根据上述分析,选用输出腔镜的透过率为 6.5%,设置泵浦电流脉冲宽度为 400  $\mu$ s,在重复频率 50 Hz 的条件下工作,成功地获得了激光静态输出,静态泵浦阈值功率为 20 W。为了得到纵模之间的最佳耦合效果,将锁模调制器尽可能地靠近输出腔镜,经调整后,静态阈值泵浦功率上升至 30 W。

决定主动锁模状态好坏较为关键因素之一,是最佳匹配腔长的确定。为了确定最佳匹配腔长,我们在计算值的基础上,通过存储示波器观察锁模状态。实验发现,当腔长偏离最佳值  $\pm 2$  mm 时,锁模脉冲包络有明显调制。当偏离值小于  $\pm 1$  mm 时,锁模脉冲包络较为光滑,除幅度略有差别之外,无十分明显区别。图 2 (a), (b) 两图分别是最佳匹配腔长下记录的锁模包络和展开后的脉冲序列波形。此时声光锁模调制器的驱动功率接近 1 W。在上述实验的基础上进一步观察单一锁模脉冲的波形,发现当匹配腔长偏离最佳值  $\pm 50$   $\mu$ m,示波器上观测的锁模脉冲有较明显的加宽。图 3 (a) 所示的脉冲波形达测量系统的分辨极限。用分辨率达 10 ps 的条纹相机进一步确定锁模脉冲的宽度和其精细结构。图 4 (a) 即为最佳匹配腔长下记录的锁模脉冲波形,其脉冲宽度为 120 ps。图 4 (b) 图则是在腔长偏离最佳匹配腔长 50  $\mu$ m 时的记录锁模脉冲波形,其结果呈多脉冲结构。

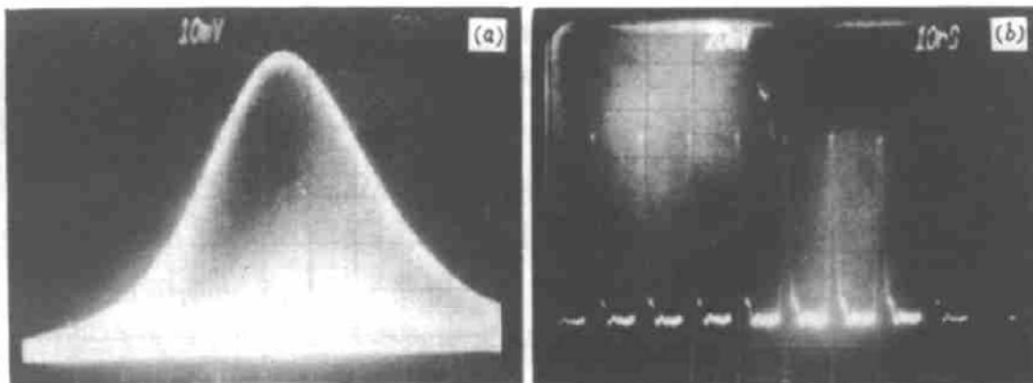


Fig. 2 An active-mode-locked Nd:YAG laser pulse-train at a 48 MHz repetition rate  
(a) envelope (500 ns/div), (b) extended in time-axis (10 ns/div)



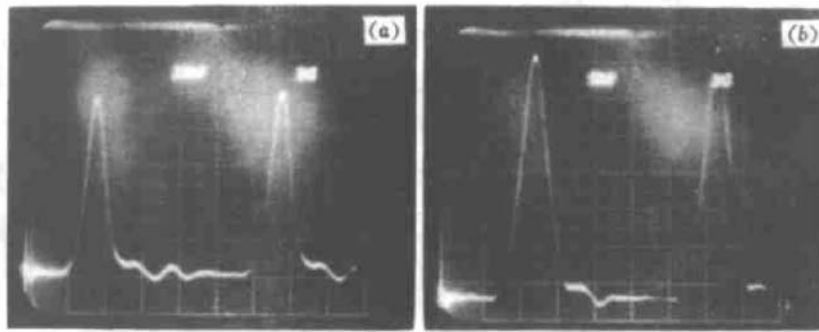


Fig. 3 Comparison of mode-locked pulses under different conditions  
(a) in good mode-locking conditions; (b) cavity mismatching of 50  $\mu\text{m}$

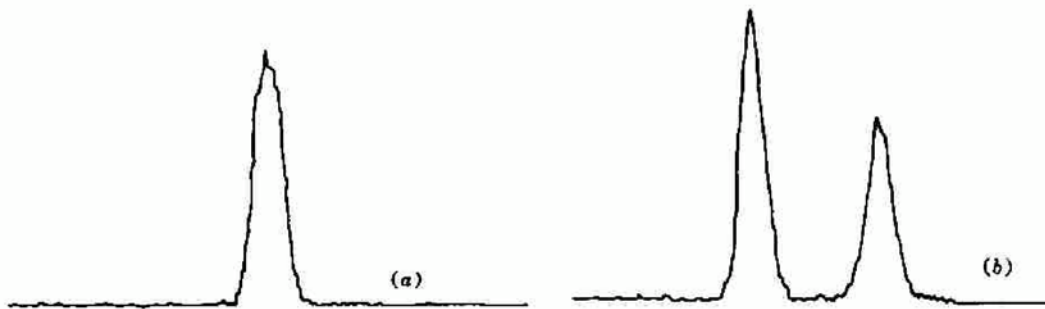


Fig. 4 The traces of mode-locked pulse train recorded by a stream camera  
(a) in good mode-locking conditions; (b) cavity mismatching of 50  $\mu\text{m}$

## 4 结果分析

初步实验结果表明半导体激光泵浦锁模固体激光器可以获得高质量的锁模脉冲,虽然实验获得的锁模脉冲的宽度仍然较宽,但与闪光灯泵浦的锁模脉冲相比已窄了很多。在我们以往的闪光灯泵浦的锁模 Nd : YAG 激光器实验中,获得的主动锁模脉冲宽度一般在 200~300 ps 之间,即使是我们研制的预激光锁模调 Q 的 Nd : YAG 激光器,其结果也是如此<sup>[4]</sup>。

根据 Kuizenga 稳态锁模理论<sup>[1]</sup>,从光场噪声中形成的锁模脉冲,要达到其稳态值需要一定的建立时间。当脉冲宽度以 5% 的误差接近稳态值时,要求脉冲在腔内的渡越次数应满足

$$M > (0.38\Delta f)/(g_0^2\theta_m f_m)$$

$M$  为渡越次数,  $\Delta f$  为激光介质增益线宽,  $f_m$  为锁模调制器的调制频率,  $g_0$  为往返饱和增益系数,  $\theta_m$  为调制深度,经计算其稳态锁模建立时间应大于 140  $\mu\text{s}$ 。因此对于建立时间仅有几个微秒的主动锁模激光器要输出近稳态值宽度的短脉冲是非常困难的。根据 Kuizenga 自洽锁模理论,在此实验条件下,在建立时间为 5  $\mu\text{s}$  时(弛豫振荡的第一个脉冲),锁模脉冲宽度的理论计算值为 250 ps,而我们的实验结果则是其理论值的一半,为此我们对激光器的静态输出进行监测,发现激光器静态输出呈明显自锁模状态,图 5 是实验观测到的自锁波形,尽管其锁模状态不彻底,但它表明激光器中有维系这种锁模状态的非线性因素。

由于谐振腔内的增益介质两表面切成布氏角,调制器的两表面也切出一个小角度,而腔镜则均为凹面,固腔内几乎不存在 F-P 效应,因此没有促使锁模形成的腔形结构,从而可认为自锁模完全是由 Nd : YAG 本身的非线性(自相位调制)引起的。由于谐振腔长  $L = 1.5 \text{ m}$ ,相应

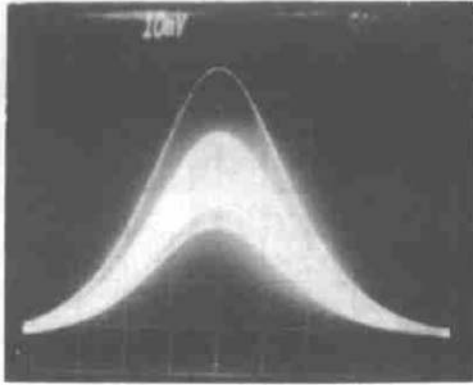


Fig. 5 The waveform shows a pulse train of the self-mode-locked Nd : YAG laser side-pumped by a laser-diode-array

的纵模间隔只有  $6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ , 而光泵密度又高 ( $2 \sim 3 \text{ kW/cm}^2$ ), 所以有很多纵模同时起振, 腔内激光强度较大, 非线性极化分量也大, 使得纵模的频率牵引量能与介质色散和谱线加宽引起的频移相比拟, 因此使得各纵模之间能建立起具有确定的频率间隔的状态。另一方面, 已有的分析表明<sup>[5]</sup>, 按照最大发射机理, 激活介质与腔镜距离小于腔长的  $1/3$  时, 正是产生强拍频信号的相位条件, 此时易锁模。本器件的增益介质与腔镜的距离小于腔长的  $1/20$ 。正是以上这些原因导致实验中观察到自锁模。

从自锁模的包络图中可以看到总共有 4 条包络线, 这表明有两组锁模系列脉冲叠加, 它们是两组满足锁模条件的纵模各自实现自锁的结果。由于两组纵模的数目不一样, 因而强度不同, 两套包络不重叠, 从而出现 4 条包络线。

有关 Nd : YAG 激光器自锁模的现象在闪光灯泵浦器件中已有过一些报道<sup>[6]</sup>, 但在 DPL 中尚未见报道。事实上目前很多的 DPL 锁模结果已超出了 Kuizenga 理论预言的范围, 人们也正在将色散、自相位调制等非线性效应考虑在内, 进一步发展稳态锁模理论。

### 参 考 文 献

- 1 D. J. Kuizenga. Short-pulse oscillator development for the Nd : glass laser-fusion systems. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(9) : 1694~1708
- 2 G. T. Maker, S. J. Keen, A. I. Ferguson. Mode-locked and Q-switched operation of a diode laser pumped Nd : YAG laser operating at  $1.064 \mu\text{m}$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(18) : 1675~1677
- 3 K. J. Weingarten, D. C. Shannon, R. W. Wallace. Two-gigahertz repetition-rate, diode-pumped, mode-locked Nd : YLF laser. *Opt. Lett.*, 1990, 15(7) : 962~964
- 4 唐贵琛, 袁佩霞, 林伟平等. 全主动锁模激光器——预激光锁模激光器. *中国激光*, 1987, 14(5) : 37~40
- 5 激光物理学编写组. *激光物理学*. 上海: 上海人民出版社, 1975. 226~235
- 6 樊立明, 朱国英, 陈时胜等. Nd : YAG 激光器中的自锁模. *光学学报*, 1992, 12(1) : 16~19

## Active Mode-locked Nd : YAG Laser Side-pumped by a Laser-diode-array

Chen Youming Zhou Fuzheng Hu Wentao Li Zhisen Yan Yu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** The performance of an active-mode-locked Nd : YAG laser operating at  $1.064 \mu\text{m}$ , side-pumped by a quasi-CW 60 W laser-diode-array is described. Pulses with durations of 120 ps at a 48 MHz repetition rate have been produced. Self-mode-locked pulses have also been observed in this laser.

**Key words** laser-diode pumping, mode-locking