

文章编号: 0258-7025(2005)05-0601-03

# 输出高重复频率脉冲列的全固态激光器

王春雨, 孔 勇, 郭明秀, 陆雨田, 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 报道了利用声光振幅调制锁模的方法, 在激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器上获得 320 MHz 高重复频率脉冲列的实验结果。实验采用平-平腔结构, 腔长 452 mm, 耦合输出镜透过率为 3.6%。所用声光介质为熔融石英晶体, 以铌酸锂作换能器, 在驱动功率 4.5 W 时, 对 1064 nm 波长衍射效率为 5%, 相应的调制深度为 0.31。在最佳锁模状态下, 激光二极管抽运功率为 3.5 W, 此时激光平均输出功率为 15 mW, 示波器记录脉冲宽度 680 ps, 实测光束质量因子  $M^2$  小于 1.5。并在实验基础上对激光器工作的稳定性进行了分析, 结果表明在腔长变化不超过  $\pm 100 \mu\text{m}$  时, 输出波形仍是稳定的。

**关键词** 激光技术; 半导体抽运; 全固态激光器; 声光调制; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## High-Repetition-Rate LD-Pumped Solid State Laser

WANG Chun-yu, KONG Yong, GUO Ming-xiu, LU Yu-tian, ZHU Xiao-lei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The experimental results of an active mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by a laser diode (LD) are reported. Laser pulses at repetition rate of 320 MHz are gained. The curvature radii of two cavity mirrors are both infinite, the cavity length is 452 mm, and coupling-out mirror transmittance is 3.6%. A high frequency melted quartz acousto-optic modulator (AOM) is used as inner modulator. With the LiNbO<sub>3</sub> crystal as energy transducer and driving power of 4.5 W, the diffractive efficiency at 1064 nm wavelength and modulating depth are 5% and 0.31, respectively. The laser average output is 15 mW at optimal mode-locking status (the pumping power is 3.5 W), and pulse width is 680 ps. The measured beam quality factor  $M^2$  is less than 1.5. Moreover, this laser pulse train is stable when cavity length deviates no more than  $\pm 100 \mu\text{m}$ .

**Key words** laser technique; diode pumped solid state laser (DPSSL); acousto-optic modulation; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal

## 1 引 言

近年来,随着激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL)技术的高速发展,用高重复频率、高输出功率全固态激光器作为通信系统发射源的研究越来越引起人们的关注<sup>[1~3]</sup>。它不仅光光转换效率高、热负载小、结构紧凑,而且能够获得优良的光束质量,其输出的高亮度保证了作为信息载体的光信号能在自由空间长距离传输。连续锁模技术是获得高重复率、高峰值功率激光脉冲的最直接最有效的手段。对激光二极管抽运固体激光器锁模特性的研究始于 20 世纪 80 年代,随着研究工作的不断深入,取得了一定的成果。贝尔实验室的 U. Keller 等<sup>[4,5]</sup>利用主动锁模和被动锁模分别在 2 GHz 和几十

GHz 的重复频率上实现了锁模脉冲运转,但还停留在实验研究阶段,不具备长期稳定运转条件。就理论而言,被动锁模比主动锁模技术更容易实现高重复频率激光脉冲输出,但被动锁模难于自启动,工作不可靠,而且难以实现脉冲同步,限制了其在激光通信上的应用。主动锁模激光器则通过在腔内插入调制元件获得锁模输出,输出稳定性和可靠性明显提高。从目前趋势看,连续主动锁模激光器被认为是解决自由空间激光通信光发射源的最具潜力的实施方案。但其难点是在腔内插入调制元件,不利于腔长的缩短,进而限制了重复频率的进一步提高,目前国内的相关报道还停留在几十兆赫兹的水平<sup>[6~8]</sup>。

本文报道了用高重复频率声光调制器(AOM)

收稿日期: 2004-04-05; 收到修改稿日期: 2004-06-21

作者简介: 王春雨(1974—),男,黑龙江省肇东市人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的相关研究。E-mail: hwangchunyu@21cn.com

作为腔内调制元件,设计激光二极管端面抽运结构,在平行平面腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中获得了 320 MHz 高重复频率激光脉冲输出的实验结果。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运激光二极管(中心波长 808 nm)经尾纤发出的光束通过透镜组汇聚到激光介质中,腔内的声光调制器则提供周期性损耗以实现锁模脉冲输出。实验选用的激光介质为质量分数 1% 掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,尺寸为 4 mm × 4 mm × 10 mm,端面镀 808 nm 和 1064 nm 双波长增透膜。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体受激发射截面大,且在 809 nm 波长附近存在较强的宽吸收峰,因而特别适合激光二极管抽运<sup>[10,11]</sup>。另外,钕酸钇是自然双折射晶体,其激光输出沿着特殊的  $\pi$  方向呈线偏振,避免了多余的热致双折射<sup>[9]</sup>;而且与 Nd:YAG 相比,其线宽较宽,更利于实现锁模运转<sup>[12]</sup>。调制器的声光介质为熔融石英晶体,其在通光方向的尺寸为 10 mm,两端镀 1064 nm 增透膜。以铌酸锂作换能器,调制器工作频率为  $f_s = 160$  MHz,实际工作点在 159.98 MHz,在驱动功率 4.5 W 时,实测对 1064 nm 波长的衍射效率为 5%。根据公式<sup>[6]</sup>  $\eta = \frac{1}{2} [1 - J_0(2\theta_m)]$ ,通过零阶贝塞尔函数曲线可得相应的调制深度为  $\theta_m = 0.31$ 。

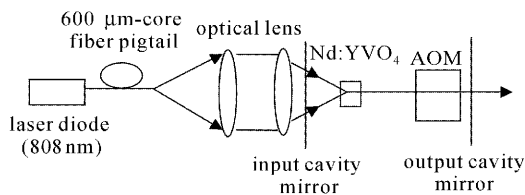


图 1 激光二极管端面抽运声光锁模 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a diode end-pumped acousto-optical mode-locking Nd:YVO<sub>4</sub> laser

由于调制频率  $f_m$  为声波频率的两倍,而锁模要求  $f_m$  精确等于  $c/2L$ ,  $c$  为光速,  $L$  为谐振腔长,据此算得谐振腔有效长度  $L = 468$  mm,考虑到插入晶体的影响,实际腔长  $L_0 = 452$  mm。实验采用平行平面腔结构,其优点在于容易实现基横模运转,这不仅有利于锁模的实现,而且保证了较好的光束质量。实验中所用输出镜对 1064 nm 波长透过率为 3.6%,为了达到更好的锁模效果,调制器应尽量靠近输出镜。

## 3 实验结果与分析

为了能精确地调节腔长,得到最佳锁模,实验中用进口平面型光电探测器(响应时间为 200 ps)及 Wavepro7000 取样示波器(带宽 1 GHz,取样率为 10 GS/s)对激光输出进行实时监测。但由于该探测器灵敏度较低,为了更好地监测输出波形,将小信号引入自行研制的光纤放大器放大后再送至光探测器<sup>[13]</sup>,放大及监测系统如图 2 所示。实验中阈值抽运电流为  $I_{th} = 13.2$  A,相应的抽运功率约为 2.6 W (实际激光二极管输出为 5.4 W,在整形及与尾纤耦合过程中约有 50% 左右的损耗)。在 452 mm 附近细调腔长,当腔长与频率相匹配时,观察到明显的锁模信号,示波器上观察到的波形如图 3 所示,脉冲重复频率为 319.9 MHz,示波器显示脉冲宽度平均值为 600 ps,最小值为 400 ps,由于该示波器带宽为 1 GHz,只能无失真地测量 1 ns 的短脉冲,几百皮秒已经达到了测量极限,因此实际脉冲宽度可能更窄。实验中调节抽运电流发现,  $I$  存在一最佳值,超过这一值时,脉冲幅度降低,直流信号增大,此处最佳电流  $I_{opt} = 14.5$  A ( $I_{opt}$  与调制器调制深度有关,但由于本实验中所用调制器已接近熔融石英晶体的高频衍射极限,调制深度较低,因此没有给出二者的具体实验关系),相应的抽运功率为 3.5 W。在最佳抽运电流处测量激光输出功率,放大器前端为 15 mW,放大后为 600 mW。

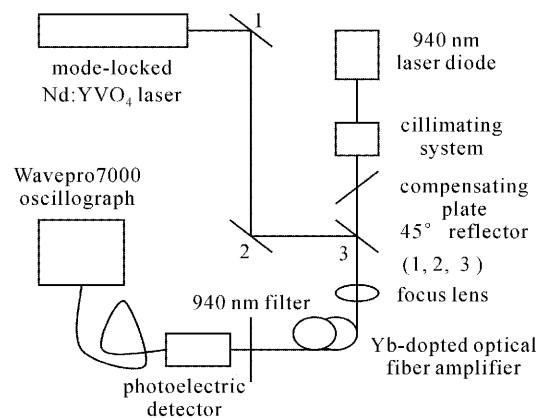


图 2 锁模输出放大及检测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of amplifying and detecting system

另外,还对激光束的光束质量进行了测量,评价光束质量的  $M^2$  因子定义为<sup>[14]</sup>

$$M^2 = D_0 \theta \frac{\pi}{4\lambda}, \quad (1)$$

$D_0$  为束腰宽度,  $\theta$  为远场发散角,  $\lambda$  为激光波长。为

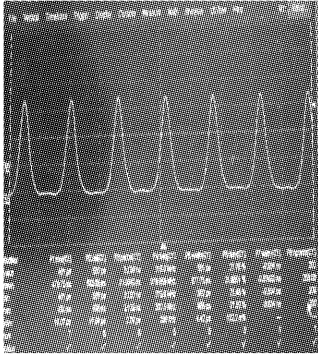


图3 示波器记录的脉冲波形(320 MHz)

Fig. 3 Output pulse of Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 320 MHz repetition rate

方便测量,(1)式可写为

$$M^2 = \frac{\sqrt{D^2 - D_0^2}}{Z} D_0 \frac{\pi}{4\lambda}, \quad (2)$$

$D$ 为距离束腰为 $Z$ 处的光束宽度。由于实验采用平平腔,因此束腰位置在输出腔镜处,实验中用可变光阑法测得 $D_0 = 1.2$  mm,距离输出腔镜 $Z = 1$  m处, $D = 1.9$  mm,计算得到质量因子 $M^2$ 小于1.5。

在激光通信中,发射源的稳定程度是一个重要指标。影响其稳定性的因素包括由于温度变化而导致的激光二极管输出功率的起伏、热效应及其他扰动而导致的谐振腔变化,调制器电匹配网络的扰动而引起的噪声干扰,驱动源的频率漂移以及激光器自身的噪声等诸多因素。在通常的连续主动锁模系统中,对输出稳定性起主要作用的因素一般是各种原因引起的腔长和频率的失配。本实验中,所用信号源为QF1055A信号发生器加自制驱动器,其频率的不稳定度为 $50 \times 10^{-6}$ ,相应的频率变化范围为16 kHz,腔长变化范围约为50  $\mu$ m。但实验中调节腔长发现,在腔长变化 $\Delta L = \pm 100$   $\mu$ m范围内,输出信号波形仍是稳定的,变化超过100  $\mu$ m后开始出现失谐,即脉冲幅度下降,脉冲底部平底部分逐渐变窄,同时信号中直流成分开始增加。实验结果表明,只要控制腔长的变化在 $\pm 100$   $\mu$ m范围内,系统输出波形基本上是稳定的。

## 4 结 论

报道在全固态激光器中利用声光振幅调制锁模获得高重复频率激光脉冲列的实验结果,在320 MHz重复频率上得到了稳定的激光脉冲序列,在最佳锁模状态下测得激光输出平均功率为15 mW,光束质量

因子 $M^2$ 小于1.5。这种高重复频率激光脉冲列能够接受高速数字编码而被用于空间激光通信系统。

## 参 考 文 献

- 1 Tan Liying, Ma Jing, Jin Enpei *et al.*. Analyzing for the distinguishing features of a variety of laser intersatellite links [J]. *Opt. Commun. Technol.*, 1999, **23**(3):192~195  
谭立英,马晶,金恩培等. 各种激光星间链路特点分析[J]. 光通信技术, 1999, **23**(3): 192~195
- 2 S. Lecomte, L. Krainer, R. Paschotta *et al.*. Optical parametric oscillator with a 10-GHz repetition rate and 100-mW average output power in the spectral region near 1.5  $\mu$ m [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(19): 1714~1716
- 3 A. E. Siegman, Jean-Marc Heritier. Analysis of mode-locked and intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser [J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(3): 324~335
- 4 K. J. Weingarten, D. C. Shannon, R. W. Wallace *et al.*. Two-gigahertz repetition-rate, diode-pumped, mode-locked Nd:YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(17): 962~964
- 5 L. Krainer, R. Paschotta, M. Moser *et al.*. 77 GHz soliton modelocked Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(22): 1846~1848
- 6 Li Chuandong, Hu Wentao, Zhang Zhengquan *et al.*. All solid-state mode-locked laser pumped by a home-made laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **7**(8): 1071~1076  
李传东,胡文涛,张正泉等. 激光二极管抽运的全固态锁模激光器[J]. 光学学报, 1997, **7**(8): 1071~1076
- 7 Chen Yuefeng, Zhang Shiwen. A 1.319  $\mu$ m CW Nd:YAG mode-locking laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 369~371  
陈越峰,张世文. 1.319  $\mu$ m连续固体锁模激光器[J]. 光学学报, 1994, **14**(4): 369~371
- 8 Chen Youming, Zhou Fuzheng, Hu Wentao *et al.*. Active mode-locked Nd:YAG laser side-pumped by a laser-diode-array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(5): 329~332  
陈有明,周复正,胡文涛等. 半导体激光侧面泵浦主动锁模Nd:YAG激光器[J]. 中国激光, 1995, **A22**(5): 329~332
- 9 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 54~56  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 54~56
- 10 Shi Peng, Zhang Hengli, Wang Yongdong *et al.*. High repetition rate electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with high beam quality output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 641~644  
石鹏,张恒利,汪永东等. 高重复率电光调Q的高光束质量Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 641~644
- 11 Yang Chengwei, Hu Yujing, Yin Xiaodong *et al.*. Experimental study on LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser passively Q-switched by Cr<sup>3+</sup>:YAG [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **31**(1): 1~4  
杨成伟,霍玉晶,尹晓东等. 激光二极管抽运Cr<sup>3+</sup>:YAG被动调Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 1~4
- 12 Junying Wang, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. Diode pumped, Cr:YAG passively Q-switched and mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 604~605
- 13 Kong Yong. Research on Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier of space Laser communication [D]. Doctor's Papers of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 2004. 63~69  
孔勇. 空间激光通信用掺镱光纤放大器研究[D]. 中国科学院上海光学精密机械研究所博士论文, 2004. 63~69
- 14 Zeng Binbin, Xu Deyan, Wang Runwen. Physical concept and measurement on laser beam quality factor  $M^2$  [J]. *Applied Laser*, 1994, **14**(3): 104~108  
曾秉斌,徐德衍,王润文. 激光光束质量因子 $M^2$ 的物理概念与测试方法[J]. 应用激光, 1994, **14**(3): 104~108