

文章编号: 0258-7025(2009)07-1822-04

# 高重复频率大能量锁模激光器技术

秘国江 杨文是 朱相帮 毛小洁 孙维娜 王伟力

(军用固体激光技术国防科技重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 建立了一套以主动-主动瞬态锁模激光器为主振荡器,一级双程预放大和两级单程放大组成的高重复频率大能量锁模激光系统,并采用了精密腔长调节、单脉冲选择、热退偏补偿及抗高功率密度光损伤等关键技术。在频率 20 Hz 时,1064 nm 单脉冲激光输出能量 $\geq 500$  mJ,脉冲宽度为 300 ps,发散角 $\leq 0.8$  mrad,外触发与出光时间抖动为 $\pm 15$  ns。用 BBO 晶体倍频,532 nm 激光输出能量 $\geq 240$  mJ,转换效率 $\geq 45\%$ 。该激光器已用于远程人造卫星测距,工作脉冲次数 $\geq 2 \times 10^8$ ,测距精度 2 cm 左右。

**关键词** 激光器; 高峰值功率; 主动-主动瞬态锁模; 精密腔长调节技术; 单脉冲选择; BBO 倍频

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1822

## High Repetition Frequency and Big Energy Mode-Locking Laser Technology

Bi Guojiang Yang Wenshi Zhu Xiangbang Mao Xiaojie Sun Weina Wang Weili

(Solid Laser Technology Key Laboratory, Beijing 100015, China)

**Abstract** The high power mode-locking laser system consists of an active-active mode-locking oscillator, a double-pass pre-amplifier, and two single-pass amplifiers. And the fine cavity length adjustment mechanics, single pulse selector, compensation for depolarization, and other key technologies are used. 1064-nm single pulse energy over 500 mJ is obtained, whose pulse duration is 300 ps, and the jitter is  $\pm 15$  ns with respect to the external trigger. In addition, 532-nm single pulse energy exceeds 240 mJ, whose harmonic generation efficiency is more than 45% by using BBO crystal. And this laser has been used in satellite laser ranging (SLR) system, with pulse shots larger than  $2 \times 10^8$ .

**Key words** lasers; high peak power; active-active transient mode-locking; precision cavity length adjust; single pulse select technology; BBO harmonic generation

### 1 引言

高重复频率大能量锁模激光器具有高峰值功率、高光束质量、窄脉冲宽度、时间波形光滑等优点,在军事、科研、工业加工、医疗和生物研究等领域有着广泛的应用。实现高重复频率大能量锁模激光器的技术路线主要有两种:一种是主振荡器采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)连续锁模技术,工作频率为 100 MHz 左右,单脉冲能量为纳焦耳量级<sup>[1]</sup>,从中选出 20 Hz 单脉冲,利用再生放大器放大  $10^7$  后到百微焦耳量级,再利用功率放大系统放大到百毫焦耳量级<sup>[2,3]</sup>。另一种是采用主动-主动(电光调 Q 和声光锁模)或主动-被动(声光锁模和染料锁模)瞬

态脉冲锁模技术,单脉冲输出能量在百微焦耳量级,可直接进行功率放大。众所周知,再生放大系统有体积庞大、光路与电路结构复杂、造价高等缺点,使它的应用受到限制。本文采用第二种技术方案,激光系统结构相对简单,整体可靠性较好。

### 2 工作原理与光学设计

在激光系统中,脉冲宽度、重复频率、发散角和外触发信号与出光时间抖动等主要指标取决于主振荡器。整个系统如图 1 所示,下面部分为声光锁模调制器与电光调 Q 相结合的主动-主动锁模主振荡器,中间为单脉冲选择器、光学隔离及扩束系统,上

收稿日期: 2008-09-09; 收到修改稿日期: 2009-01-13

作者简介: 秘国江(1973—),男,高级工程师,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: bi\_gj@163.com

面部分为氙灯抽运的一级双程预放大、两级单程功率放大和倍频系统。

主振荡器加抽运脉冲的同时，在电光 Q 开关上加接近  $\lambda/4$  的电压，以减小谐振腔的 Q 值<sup>[4]</sup>。谐振腔在工作时稍微超出阈值，在弛豫振荡的起伏竞争中形成锁模激光脉冲。弛豫振荡停止后，快速去掉 Q 开关上的  $\lambda/4$  电压，谐振腔处于高 Q 值状态。由于增益很高，锁模脉冲被放大若干量级。在 Q 开关过程中，产生 10 个左右的锁模子脉冲序列，脉冲之间的时间间隔与谐振腔的长度相关，即  $2L/c$ 。Q 开关的触发信号在时间上精确可控，外触发信号与出光时间的抖动可控制在  $\pm 15$  ns 范围内。

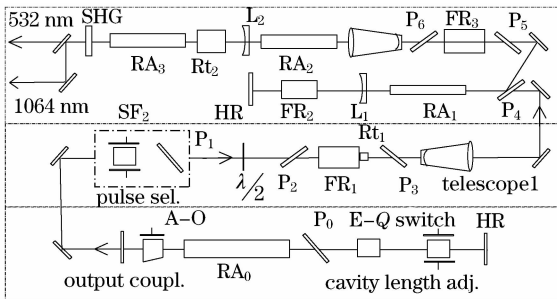


图 1 高重复频率大能量锁模激光器光路图

Fig. 1 Optical arrangement of high repetition frequency and big energy mode-locking laser

锁模主振荡器输出的子脉冲序列，单选后经光学隔离、扩束到放大级。激光脉冲的能量和功率等主要取决于激光放大器。考虑到大功率抽运、高峰值功率下的光学器件的抗损伤阈值、热透镜、热退偏与热畸变等因素，功率放大器采用  $\phi 8$  mm 一级双程和  $\phi 10$  mm 两级单程，达到预定的增益，并具有较好的光束质量。对于皮秒量级脉冲宽度的超短脉冲激光而言，倍频晶体选择光学损伤阈值较高的 BBO 晶体。

### 3 关键技术

#### 3.1 腔长精密调节技术

锁模激光器一般采用机械或压电陶瓷移动腔镜

的方法来精密调整谐振腔的长度，对机械加工精度要求很高，且易引起谐振腔的失谐，调整精度在百微米量级。而采用大小两个等腰三棱镜组成的腔长精密补偿器如图 2 所示，置于谐振腔内。调整入射光线与棱镜的夹角，当出射光线对角度的变化不敏感时，折射光线与棱镜底边平行，此时出射光线方向为最小偏向角。大棱镜固定于精密调整底座上，垂直于棱镜底边的方向上有精确限位导轨，在此方向上移动大棱镜，即可改变谐振腔的光程。此腔长精密调节器具有两个优点：一是水平方向上光程的改变量要小于垂直方向上的机械移动量，腔长调整精度提高；二是在调腔长过程中，光束的位置和方向变化极小，不影响谐振腔的腔镜耦合，大大降低了锁模主振荡的调整难度。此外，棱镜对具有色散补偿作用，理论上对二阶色散可以完全补偿，对激光脉冲宽度 300 ps 的展宽可以忽略。

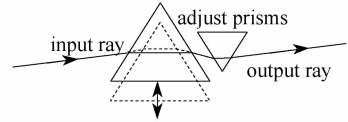


图 2 腔长精密调节器示意图

Fig. 2 Scheme for the precision cavity length adjustment

#### 3.2 单脉冲选取技术

主振荡器工作电压为 770 V 时，输出包含 10 个间距均为 7.2 ns 的锁模子脉冲序列，中间子脉冲幅值最高，如图 3(a)所示。用光电探测器探测到包络的首个锁模脉冲后，产生一个触发信号，延时  $40 \pm 5$  ns 后，触发雪崩串双 KD\* P 调 Q 电路，产生宽度约 10 ns 的 4.5 kV 高压<sup>[5]</sup>，从脉冲包络里选出中间幅值较高的单脉冲如图 3(b)所示，作为放大级的信号源。剩下的子脉冲包络如图 3(c)所示。

锁模子脉冲序列的能量可达 8 mJ，选出的单脉冲能量为 1.2 mJ，输出光斑为单横模，如图 4 所示，光束质量接近衍射极限。

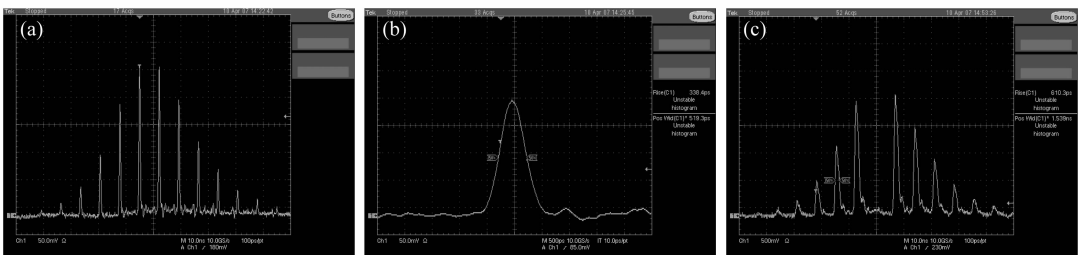


图 3 (a) 子脉冲包络波形；(b) 选出的单脉冲；(c) 剩下的子脉冲包络波形

Fig. 3 (a) Pulse train; (b) selected pulse; (c) residual pulse train

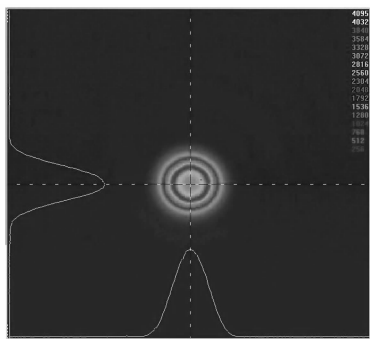


图4 单脉冲光斑

Fig. 4 Far field beam disk of the selected pulse

### 3.3 大功率注入下激光工作物质热透镜和热退偏效应的补偿技术

高功率激光系统中,热吸收和光致产生的应力导致了激光介质产生双折射效应,使得激光束的偏振状态发生改变,产生退偏<sup>[6~10]</sup>。重复频率 20 Hz,聚光腔氙灯抽运电功率 810 W 时,退偏为 29%,这对光路中的光隔离、倍频和光束质量极为不利。图 5(a)为 20 Hz 氙灯在抽运功率 810 W 时,单级放大输出检偏后的光斑,可见单级放大退偏很严重。预放级 $\phi 8$  mm 双通的热退偏是光束两次通过 $\phi 8$  mm 放大级与全反镜之间的 $45^\circ$ 法拉第旋光器,偏振态旋转 $90^\circ$ ,使其径向和切向偏振分量交换,热退偏相互抵消。 $\phi 10$  mm 两放大级通过之间的 $90^\circ$ 旋光器消除热退偏。这样激光器工作在大功率注入下,整个光路中的热退偏下降很多。经 $\phi 10$  mm 两放大级单通放大,聚光腔氙灯抽运电功率均为 810 W 时,光斑如图 5(b)所示,能量 $\geq 500$  mJ,退偏 $\leq 15\%$ 。

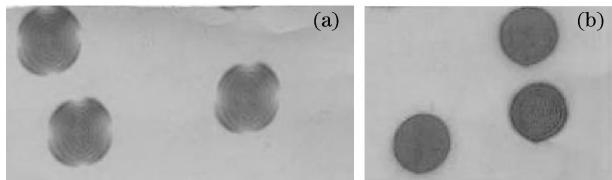


图5 放大级近场光斑。(a)单级放大检偏后光斑;  
(b)采取消退偏措施后的检偏光斑

Fig. 5 Near field beam disk of single amplified (a) and using depolarization technology after the polarizer (b)

### 3.4 高功率密度抗激光损伤和消除自激技术

激光脉冲宽度只有 300 ps,放大系统激光的峰值功率密度 $\geq 2.0$  GW/cm<sup>2</sup>,光学元件易受损伤。抗光学损伤设计非常重要,光束的空间分布要近似平顶,合理选择通光孔径、膜层结构并采取防尘措施。在主振荡器和预放大级之间、预放大级和后两级单程放大之间均采用法拉第隔离系统,防止产生自激、光学破坏和扰乱波形。

## 4 脉冲宽度的测量与分析

激光脉冲的半峰全宽(FWHM)是一项非常关键的技术指标。在脉冲功率放大和基频光倍频过程中,脉冲宽度要发生变化。小信号放大脉冲宽度稍有压缩,而饱和放大脉冲宽度稍有展宽,故在放大过程中脉冲宽度变化不大。但倍频后,倍频光脉冲宽度要明显窄于基频光脉冲宽度。根据经验公式,基频光与倍频光脉冲宽度之比为 $\sqrt{2}:1$ ,基频光脉冲宽度为 300 ps 倍频后,倍频光脉冲宽度约为 263 ps。

皮秒激光的脉冲宽度测量方法较多,有条纹相机、二次谐波相关法、宽带示波器等。本文采用了最常用的超快光电探头和宽带示波器直接测量的方法。激光脉冲宽度为百皮秒量级,而示波器和超快光电探头均有上升、下降沿时间,已经不可忽略。一个示波器脉冲宽度测量值 $T_{me}$ 包含了实际激光脉冲宽度 $T_{re}$ 和示波器、超快光电探头的上升、下降沿时间 $T_{os}$ , $T_{od}$ ,则激光脉冲的实际宽度为

$$T_{re} = 2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} T_{me} \right)^2 - T_{os}^2 - T_{od}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

用带宽 12 GHz Aglient 示波器(上升沿时间 36.5 ps)和超快光电探测器 THORLABS SV2-FC(响应波长范围 320~1100 nm,上升沿时间 $\leq 120$  ps)测量主振荡器输出脉冲宽度为 355 ps,如图 6 所示。根据公式可得实际脉冲宽度为 251 ps,与理论值比较相符。

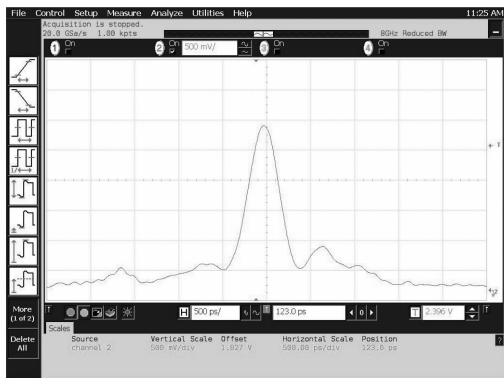


图6 12 GHz 示波器测得的倍频脉冲波形

Fig. 6 12 GHz oscilloscope trace of the SHG laser pulse

## 5 结论

在频率为 20 Hz 时,锁模主振荡器单选后输出能量为 0.5 mJ,经隔离扩束等损耗到放大级时为 0.3 mJ。预放大级 $\phi 8$  mm 可看作为小信号放大,双程增益大于 100 倍; $\phi 10$  mm 两级单程放大为大信号放大,增益为 10 倍。最终 1064 nm 激光输出能量 $\geq$

500 mJ, 脉冲宽度为 300 ps, 发散角 $\leq 0.8$  mrad。BBO 倍频激光能量 $\geq 240$  mJ, 转换效率 $\geq 45\%$ , 脉冲宽度约 250 ps。并取得了如下技术进步:

1) 对主动-主动电光调 Q 和声光脉冲锁模技术进行了研究, 把触发信号与出光的时间抖动由  $\mu\text{s}$  缩小为 ns 量级; 采用了精密腔长调节技术, 大大降低了锁模激光器的调整难度。

2) 在功率放大方面, 解决了皮秒激光放大、抗高功率激光损伤、高功率注入下热退偏效应的补偿等关键技术, 实现了系统长时间稳定可靠工作。

此激光器系统已用于远程人造卫星测距, 工作脉冲次数 $\geq 2 \times 10^8$ , 测距精度 2 cm 左右。此激光器系统外触发信号与出光抖动小, 仅为  $\pm 15$  ns, 在国内用于星地时间对比试验, 获得了成功。

### 参 考 文 献

- 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): 159~162  
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
- J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein. 13-W picosecond Nd: GdVO<sub>4</sub> regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**: 163~166
- Wei Hui, Zhang Shengjia, Xu Shizhong *et al.*. LDA pumped Nd: YLF regenerative amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 677~679  
韦 辉, 张生家, 许世忠等. LDA 抽运 Nd: YLF 再生放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 677~679
- Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. fourth edition, New York: Springer, 1995. 500~561
- Mang Yanping, Ouyang Bin, Zhang Binjun *et al.*. High performance single pulse selector for mode-locked lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(8): 561~565  
莽燕萍, 欧阳斌, 张秉钧等. 高性能激光单脉冲选择器[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(8): 561~565
- Chen Jun. *Optic Phase Conjugation and Application* [M]. Beijing: Sciences press, 1999. 167~171  
陈 军. *光学相位共轭及应用*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 167~171
- Liu Chong, Ge Jianzhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd: YAG rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1483~1487  
刘 崇, 葛剑虹, 项 震等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- Dai Shutao, Ji Jianghua, Zhu Xiaolei. Novel double Q-switcher for thermal induced depolarization compensation in all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 337~340  
戴殊韬, 纪江华, 朱小磊. 双调 Q 开关热退偏补偿全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 337~340
- Liu Danping, Hu Yu. Experimental study of overcoming laser rod's thermal effect with stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 184~187  
刘丹平, 胡 渝. 利用受激布里渊散射相位共轭镜克服激光棒热效应的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 184~187
- Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858  
程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858