

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0039-04

新型精密腔长补偿器在主动-主动瞬态 脉冲锁模激光器中的应用

秘国江 王 旭 毛小洁 邓明发 钟国舜 吴 健 杨文是

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要 主动锁模激光器对激光腔长的稳定性要求很高,百微米的腔长变化可造成锁模失谐,严重影响锁模输出稳定性。采用传统的机械或压电陶瓷直接移动腔镜调整腔长的方法,易造成腔镜失谐,工作量非常大。研制了一种新型精密腔长补偿器,结构简单、方便实用,腔长调节精度会大幅提高,且不易造成腔镜失谐,对皮秒激光脉宽的展宽影响可以忽略。此外,对新型精密腔长补偿器的工作原理、补偿精度和腔镜失谐的影响等进行了理论分析和数值计算;将其应用于高峰值功率主动-主动瞬态脉冲锁模激光系统,经长时间的应用,发现其稳定可靠,具有一定的应用价值。

关键词 激光技术;精密腔长补偿器;主动-主动锁模;腔长失谐

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0039

Apply of a New Precision Cavity Length Adjustment in Active-Active Transient Mode-Locking Laser System

Bi Guojiang Wang Xu Mao Xiaojie Deng Mingfa Zhong Guoshun
Wu Jian Yang Wenshi

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract Active-active mode-locking laser is very strict to its cavity length, and any small changes may result in mode-locking failure. The usual way to adjust the cavity length easily leads to cavity mirror mismatch. In this paper, precision cavity length adjustment is studied and a new way to adjust the cavity length is reported, which doesn't easily result in cavity mirror mismatch. The precision of cavity length adjustment and the effect to the laser pulse width are also studied. Moreover, it is used in active-active mode-locking laser and good result is obtained.

Key words laser technique; precision cavity length adjustment; active-active transient mode-locking; cavity length mismatch

1 引 言

锁模激光器具有高峰值功率、高光束质量、窄脉宽和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。

锁模激光器的锁模方式主要有两种:被动锁模和主动锁模。被动锁模方式一般有染料锁模、可饱和吸收体锁模等方式,输出激光脉冲宽度较窄(10 ps量级)^[1~3];主动锁模一般采用声光(AO)锁模开关进行损耗内调制,或称为振幅调制(AM),输出激光脉冲序列在时间上精确可控(纳秒量级)。在

主动锁模激光器中,将声光锁模调制器置于腔的一端,其工作频率设置成光脉冲在腔内振荡频率的1/2。只有满足此条件时,谐振腔内的光信号才能每次无损耗地通过调制器,并且该光波在腔内往返通过工作物质时会不断得到放大。如果腔内的损耗及增益控制适当,那么将形成脉宽很窄、周期为光脉冲在腔内的振荡周期的锁模脉冲序列输出^[4]。当调制频率和腔长不匹配时,光信号每次通过声光调制器时都会有所损耗,严重影响锁模效果,故主动锁模激光器对谐振腔长要求很严格。

收稿日期: 2009-12-08; 收到修改稿日期: 2010-01-25

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

传统采用机械或压电陶瓷移动腔镜来调节谐振腔长度的方法,对机械加工精度要求很高,调整误差大,且易引起谐振腔镜的失谐,工作量很大。本文采用大小两个等腰三棱镜组成的精密腔长补偿器来调节谐振腔长。将其置于谐振腔内,移动大棱镜即可改变谐振腔光程。此精密腔长补偿器具有两个优点:1)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,大大降低了锁模激光器的调整难度;2)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。该补偿器可以稳定可靠地应用于高峰功率主动-主动瞬态脉冲锁模激光系统,具有一定的应用价值。

2 工作原理与理论分析

将精密腔长补偿器的小棱镜固定,大棱镜固定于可移动的精密调整底座上,两个棱镜的相邻通光面严格平行,如图1所示。由几何光学可知,调整入射光线与大棱镜的夹角,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^[5]。垂直于大棱镜底边的方向上有精确限位导轨,可保证棱镜垂直于(棱镜底边)折射光线移动,在此方向上移动大棱镜,即可改变谐振腔的光程。研制的精密腔长补偿器采用石英材料,棱镜顶角为 70° ,光线入射角为布氏角,省去了通光面的镀膜,实物如图2所示。

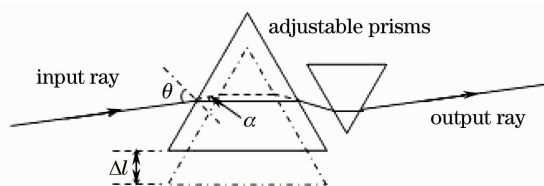


图1 精密腔长补偿器示意图

Fig. 1 Scheme for the precise cavity length adjustment

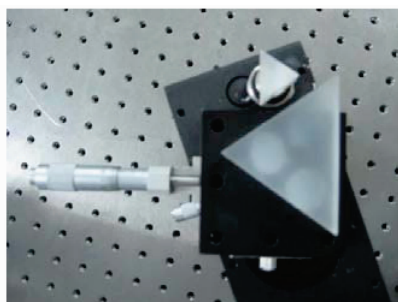


图2 腔长精密调节器

Fig. 2 Photo of the precise cavity length adjustment

垂直底边方向上移动大棱镜时,光程调整精度提高,入射光线与出射光线的方向不发生变化,对皮秒激光脉宽的影响可以忽略。

2.1 光程补偿精度的分析

如图1所示,精密腔长补偿器中 θ 为光线入射角, α 为入射角与折射角之差, n 为棱镜材料的折射率。大棱镜在垂直底边方向上移动 Δl 后,实际光程变化量 $\Delta l'$ 与机械移动量 Δl 间的关系为

$$\Delta l' = 2 \left(n \cot \alpha - \frac{1}{\sin \alpha} \right) \frac{\cot \theta}{\cot \alpha - \cot \theta} \Delta l. \quad (1)$$

当光线入射角为布氏角时,(1)式可简化为

$$\Delta l' = 2 \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \Delta l. \quad (2)$$

当棱镜材料为石英时,折射率 $n_{\text{quartz}} = 1.45$,实际光程变化量与机械移动量间的关系 $\Delta l'_{\text{quartz}} = 0.71 \Delta l$ 。

当棱镜材料为k9玻璃时,折射率 $n_{\text{k9}} = 1.51$,实际光程变化量与机械移动量间的关系 $\Delta l'_{\text{k9}} = 0.78 \Delta l$ 。

可见,采用新型腔长精密调节器后,水平方向上光程的变化量要小于垂直方向上的机械移动量,具有腔长调整精度高的优点。当棱镜材料为石英时,比棱镜材料为k9玻璃时调节精度要稍高些。大棱镜的机械移动精度可准确到 0.02 mm ,那么采用精密补偿器后,光程变化精度可控制在 0.014 mm 。

2.2 出射光线方向不敏感度的分析

单个等腰棱镜,当折射光线平行于底边时,此时光线的出射方向对入射角 θ 的变化不敏感,即出射角为最小偏向角 δ ,如图3(a)所示。偏向角随入射光线角度的敏感性如图3(b)所示。在最小偏向角附近,当入射角小于布氏角时,随着入射角度变化量 $\Delta \theta$ 的增大,最小偏向角逐渐增大,当 $\Delta \theta$ 超过一定范围后, $\Delta \delta$ 变得非常敏感。而入射角大于布氏角时,在 $\Delta \theta$ 增大的过程中,最小偏向角附近出射光线方向的变化不明显。

由于精密腔长补偿器采用了棱镜对技术,第二个棱镜与第一个棱镜放置方式相反。理论分析表明,即使在最小偏向角附近,出射光线与棱镜对入射光线的方向变化量相同^[6]。因此,理论上棱镜对不会减小或增加出射光线方向的敏感性。

加工好的棱镜补偿器,棱镜在移动方向上有精确的限位,同时移动过程中带来的微小偏差不会被放大。而直接移动腔镜,带来的腔镜旋转可引起失

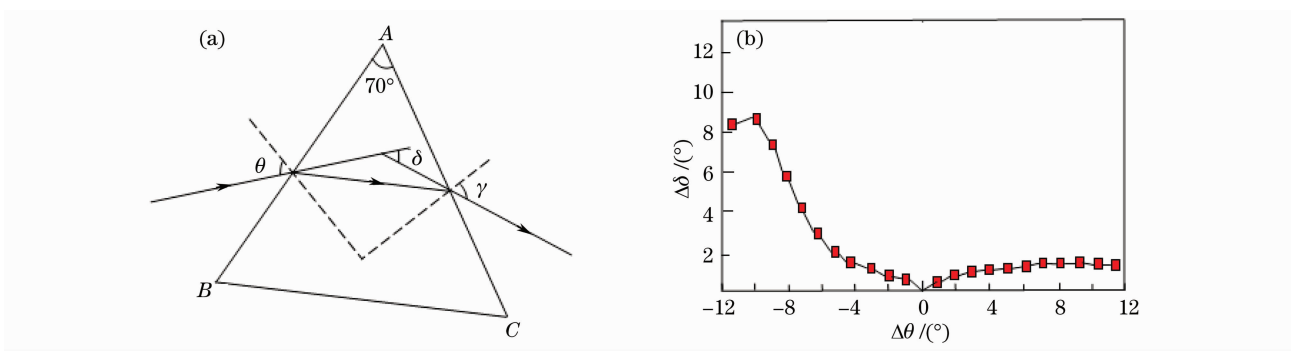


图 3 (a)最小偏向角时,(b)单个棱镜出射光线对入射光线方向变化的敏感性

Fig. 3 (a) Near the minimcon angle of deviation of the single prism, (b) the dependence of the output beam direction on the input beam direction

谐。由以上分析可知,在精密腔长补偿器调腔长的过程中,光束的位置和方向变化极小,不影响谐振腔的腔镜耦合,降低了锁模主振荡的调整难度,大大降低了工作量。

2.3 脉宽展宽的分析

单个棱镜折射可以引起色散,对锁模激光脉冲宽度有展宽作用,但第二个棱镜具有色散补偿作用。1984年 Fork 等^[7]分析了棱镜对的色散补偿作用,并将棱镜对作为色散补偿元件插入激光腔中进行了色散补偿实验。棱镜对结构简单,色散量可以通过调整棱镜的间距和插入量进行补偿。同时调节方法非常简单,可以连续调整色散补偿量,并且理论上可以完全补偿二阶色散。这一切都使得棱镜对在飞速发展的超短技术领域始终保持色散补偿元件的主导地位。

大于 100 fs 的激光脉冲,影响脉冲展宽的色散量可以只考虑二阶色散。实验中,锁模激光脉冲宽度为 300 ps,远远大于 100 fs,故棱镜对对脉宽变化的影响可以忽略。

3 在主动-主动锁模激光器系统中的应用

主动-主动瞬态锁模主振荡器如图 4 最下面一部分所示,声光锁模器靠近输出镜,工作频率为 70 MHz,电光 Q 开关靠近全反镜,光阑直径大小为 1.6 mm。腔长要考虑激光工作物质和光学器件的折射率,实际光程为 $L = \frac{c}{4f_m} = 107.14 \text{ mm}$ 。

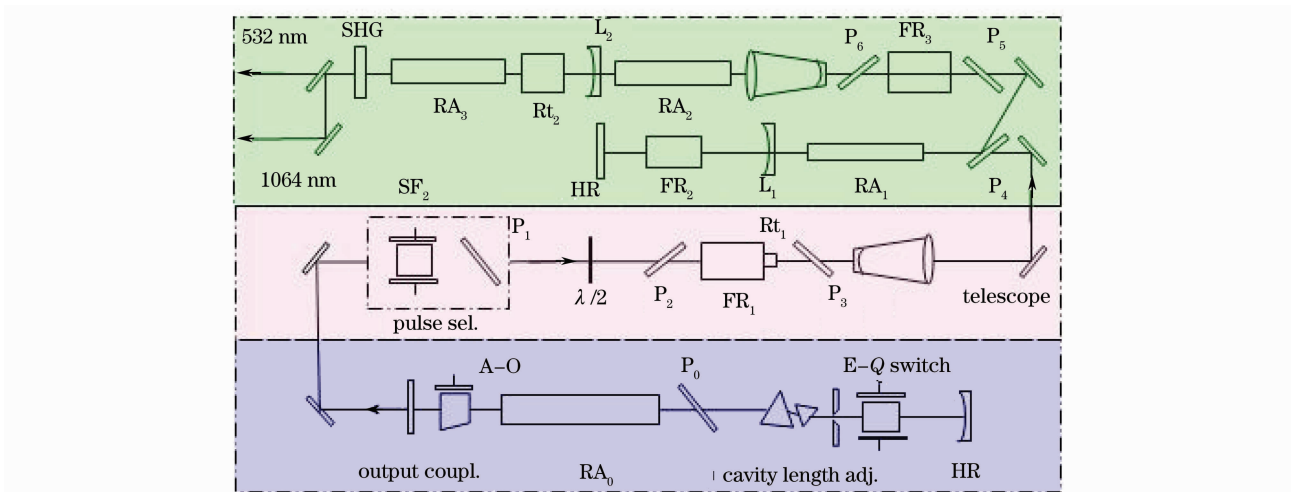


图 4 主动-主动锁模激光器系统光路图

Fig. 4 Optical arrangement of the active-active mode-locking laser system

3.1 谐振腔的灵敏度

当谐振腔为平凹腔时,稳定性较好。这里的稳定性:1)指由于激光原理中特定的参数而使谐振腔在光学上稳定或不稳定;2)指模尺寸和位置对光学

元件的机械和光学扰动的灵敏度。这里主要讨论谐振腔镜的调整误差对谐振腔灵敏度的影响。谐振腔镜曲率半径分别为 R_1 和 R_2 ,两镜相距为 L 的谐振腔,全反镜旋转 θ 角时,由文献[8]可知引起线位

移为

$$x = \frac{R_1(R_2 - L)\theta}{R_1 + R_2 - L}, y = \frac{R_1 R_2 \theta}{R_1 + R_2 - L}. \quad (3)$$

此装置中,全反镜为平凹镜,半径 5 m,输出镜为平平镜,谐振腔长为 L ,可知全反镜倾斜 θ 角时, $x \approx y \approx L\theta$ 。当 $L=5$ m 时, $x \approx y \approx 5\theta$ 。由文献[8]可知,能量下降 10% 时的调整误差为 15" 左右。实验发现移动精密腔长补偿器时,对谐振腔镜的失谐没有影响。

此外,由于主振荡器采用了主动-主动瞬态脉冲锁模工作方式,激光器增益较高,故对谐振腔长的精度比主动连续锁模的要求要稍低些。为了减小机械形变,主振荡器底板采用了“工”字型底梁结构。主振荡器的全反镜架固定于底板,通过 3 根直径 1 cm 的碳纤维杆与输出镜架连接,输出镜架与底板通过滑配结构固定,减小了环境温度变化对腔长的影响。

3.2 应用结果

主振荡器输出的锁模脉冲序列的能量可达 8 mJ,选出的单脉冲能量为 0.7 mJ,脉宽为 300 ps。主动-主动锁模激光器系统光路如图 4 所示。主振荡器输出的子脉冲序列,单选后经光学隔离、扩束到功率放大器。采用了一级双程和两级单程的功率放大器,达到预定的增益,并具有较好的光束质量^[9]。经放大后 1064 nm 输出能量大于等于 500 mJ,脉冲宽度 300 ps,发散角小于等于 0.8 mrad。倍频后能量大于等于 240 mJ,效率大于等于 45%,脉宽小于等于 300 ps^[10]。此激光器系统已用于远程人卫测距,工作脉冲次数大于等于 1.8×10^8 ,测距精度 2 cm 左右,受到客户好评,样机如图 5 所示。

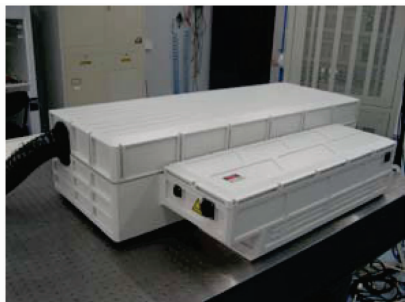


图 5 高峰值功率锁模激光器样机

Fig. 5 Photo of the high peak power mode-locking laser

高重复频率大能量高光束质量锁模激光器在远程精确测距、光电干扰、致盲等军事领域以及科研、工业加工、医疗和生物研究等领域有着广泛的应用。

4 结 论

精密腔长补偿器具有以下 3 个优点:

1) 在调节过程中,光束的位置和方向变化极小,不影响谐振腔的腔镜耦合,大大降低了锁模激光器腔长的调整难度;

2) 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。

3) 对皮秒激光脉宽的展宽作用可以忽略。

精密腔长补偿器不仅可以应用于主动锁模激光器精密调节谐振腔长,还可用于其他需精密调节光程的系统,并且损伤阈值高、使用方便。

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): 59~62
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:GdVO₄ regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(2-3): 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, 张生佳, 许世忠 等. LDA 泵浦 Nd:YLF 再生放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 677~679
- W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Virginia: Springer Science, 1995. 500~561
- Guo Yongkang, Bao Peidi. Optics Tutorial. [M]. Chengdu: Sichuan University Publishing Company, 1993. 22~25
郭永康, 鲍培沛. 光学教程 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1993. 22~25
- Paul R. Yoder, Jr. Optics and Machine System Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl.. Beijing: China Machine Press, 2008. 340~348
Paul R. Yoder, Jr. 光机系统设计 [M]. 周海宪, 程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2008. 340~348
- R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 180~182
- Li Shimin, Huang Weiling *et al.*. Laser Apparatus Elements and Design [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1998. 199~210
李适民, 黄维玲 等. 激光器件原理与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 199~210
- Liu Chong, Ge Jianhong, 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
- Bi Guojiang, Yang Wenshi, Zhu Xiangbang *et al.*. High repetition and big energy mode-locking laser technology research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1822~1824
秘国江, 杨文是, 朱相帮 等. 高重复大能量锁模激光器技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1822~1824