

# 自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器腔内 脉冲双向啁啾补偿\*

张伟力 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 天津 300072)

**提要** 研究了腔内脉冲双向啁啾补偿方法,实现了 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器稳定的低泵浦自锁模运转,将 Ar<sup>+</sup> 激光泵浦功率降低到 2.4 W,获得了 220 mW, 36 fs 的锁模脉冲输出。

**关键词** 自锁模,双向啁啾补偿, Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器

## 1 引 言

自锁模(Self-mode-locking) Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器以其宽调谐光谱、短脉冲宽度、高输出功率及优良的稳定性,已经逐步取代碰撞锁模(CPM)染料激光器,成为最有应用前景的飞秒激光光源<sup>[1]</sup>,广泛应用于多学科超快过程的研究。自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的发展趋势是完善腔内脉冲啁啾补偿,实现低泵浦功率下的短脉宽、宽调谐运转。目前该类激光器稳定的自锁模运转要求 Ar<sup>+</sup> 激光单模泵浦功率一般为 5~6 W<sup>[2~5]</sup>,泵浦阈值较高,这对于国产 Ar<sup>+</sup> 激光器是一个苛刻的要求。

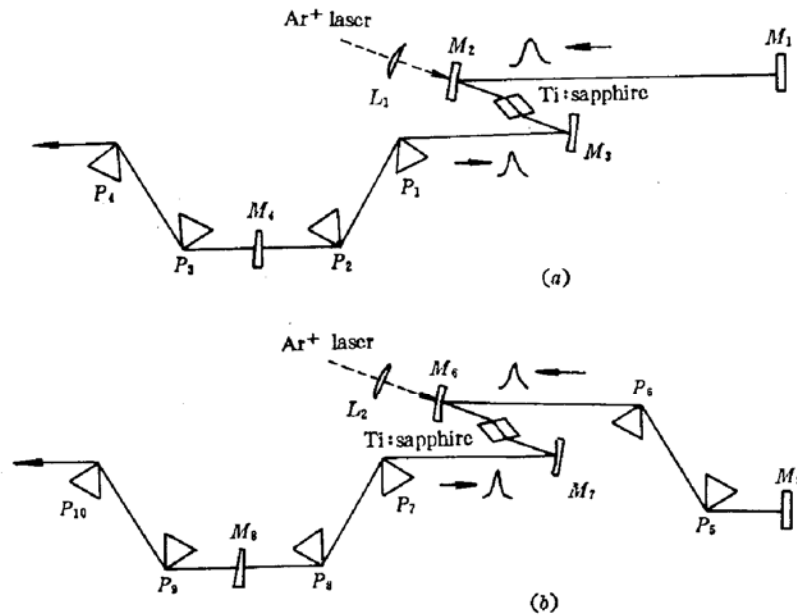
自锁模的形成,是由于强激光通过非线性光学增益介质时,产生克尔自聚焦效应<sup>[6]</sup>,引起腔内光强空间分布的变化,此时通过引入与光强有关的调制,使强度高的部分对应较小的损耗,而强度低的部分对应的损耗较大,从而实现锁模运转。自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器采用通常的线形折叠腔结构,由于腔内啁啾补偿只发生在增益介质的一侧,而在另一侧的脉冲啁啾不能得到充分补偿而使脉冲被展宽,因而作为克尔锁模主要机制的克尔自聚焦效应将被削弱,必然导致自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器有较高的泵浦阈值。本文对自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器腔内脉冲啁啾特性进行了实验研究,采用双向啁啾补偿结构,实现了 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器稳定的低泵浦自锁模运转,将 Ar<sup>+</sup> 激光泵浦功率降低到 2.4 W。

## 2 实 验

自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器实验装置如图 1 所示。(a) 为传统的“Z”形折叠腔结构,脉冲啁啾为单向棱镜补偿;(b) 采用双向啁啾补偿结构。实验中, Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体长度为 7 mm,采用布儒斯

\* 国家攀登计划及天津大学光电子信息工程开放实验室资助课题。

收稿日期: 1996—08—16; 收到修改稿日期: 1996—10—17

图1 自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器光路图

(a) 传统的线形腔结构; (b) 双向啁啾补偿结构

Fig. 1 Schematic of the self-mode-locked Ti:sapphire laser

(a) the traditional cavity configuration; (b) two-way chirp compensation configuration

特角切割,吸收系数为  $\alpha_{490} = 5.0 \text{ cm}^{-1}$ 。  $L_1, L_2$  为泵浦光聚焦透镜,镀  $0.47 \sim 0.53 \mu\text{m}$  波长的增透膜,焦距为  $f = 110 \text{ mm}$ 。  $M_2, M_3, M_6$  和  $M_7$  为曲率半径  $R = 100 \text{ mm}$  的双色球面镜,对  $750 \sim 850 \text{ nm}$  波长全反,同时对  $0.47 \sim 0.53 \mu\text{m}$  波长增透。  $M_1$  和  $M_5$  为全反射镜,工作波长为  $750 \sim 850 \text{ nm}$ 。  $M_4$  和  $M_8$  为楔形输出镜,  $800 \text{ nm}$  处透过率为  $7\%$ 。 (a), (b) 两激光器均由色散端输出,并采用腔外色散再补偿结构。  $P_1, P_2, P_5 \sim P_8$  为腔内色散棱镜;  $P_3, P_4$  及  $P_9, P_{10}$  为腔外色散补偿棱镜,分别相对于输出镜  $M_4$  和  $M_8$  与  $P_1, P_2$  及  $P_7, P_8$  对称。棱镜均由熔石英制成,顶角切割成  $69^\circ$ 。脉冲宽度的测量采用低色散共线光学相关器,二次谐波晶体为  $100 \mu\text{m}$  的 BBO 晶体,可测量获得锁模脉冲的强度自相关(3:1)函数曲线和干涉自相关(8:1)函数曲线。

对于图 1 (a) 所示的激光器,当自锁模运转时,假设腔内脉冲在左侧往返经过色散棱镜后,返回 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体之前的啁啾量为零,此时获得腔内最窄脉宽。而脉冲经过晶体后将带有正啁啾,在右侧往返一次由  $M_2$  反射进入晶体时脉冲变宽,这将削弱晶体中的克尔自聚焦效应。我们在实验中曾经发现,分别以激光器的左右两端作输出,所测得脉冲宽度有明显差别,右端输出的脉冲宽度总是明显宽于左端。因此,对于克尔自聚焦效应的贡献主要来自于左侧的无啁啾脉冲,而导致自锁模运转需要较高的泵浦功率,同时也增加了自锁模运转的不稳定因素,锁模运转范围较窄。对于图 1 (b) 所示的激光器,在右侧引入另一对色散棱镜,适当调整腔内棱镜的色散量,使得由 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体造成的啁啾在激光器的两侧均得到补偿,两个方向传输的光脉冲均以较窄的脉宽通过 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体,从而使锁模脉冲在腔内始终保持无啁啾传输。因此,两个方向传输的光脉冲对于克尔自聚焦效应有同样的贡献,可明显降低自锁模运转的泵浦功率,同时也增加了自锁模运转的稳定性,使锁模运转范围加宽。

在实验中,首先建立图 1 (a) 所示的单向啁啾补偿自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器。依据腔内二、三阶啁啾补偿要求并考虑实验平台的空间限制,取棱镜 P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub> 间距为 70 cm。调整腔内各光学元件,优化 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器连续光运转条件,以降低自锁模运转的泵浦功率。当以 3.6 W Ar<sup>+</sup> 激光泵浦时,可实现长时间稳定的自锁模运转,脉冲中心波长为 770 nm,输出功率为 300 mW。锁模脉冲相关函数及光谱曲线如图 2 (a) 所示,自上而下分别为脉冲的强度自相关(3:1)函数曲线、干涉自相关(8:1)函数曲线及光谱曲线。假设为双曲正割型,脉冲宽度为 35 fs,谱宽为 21.4 nm,  $\Delta\tau\Delta\nu = 0.379$ 。低于该泵浦功率,锁模运转不再稳定,主要为连续光运转。对于图 1 (b) 所示的双向啁啾补偿结构,调整棱镜 P<sub>7</sub>,P<sub>8</sub> 的间距为 55 cm,棱镜 P<sub>5</sub>,P<sub>6</sub> 的间距为 45 cm。在未插入 P<sub>5</sub>,P<sub>6</sub> 的状态下首先使激光器能够自锁模运转,再插入 P<sub>5</sub>,P<sub>6</sub>,并优化 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器连续光运转条件。由于脉冲啁啾在激光器的两侧均得到补偿,明显降低了 Ar<sup>+</sup> 激光的泵浦功率,在 2.4 W 泵浦时,仍可实现长时间稳定的自锁模运转,脉冲中心波长为 771 nm,输出功率为 220 mW。锁模脉冲相关函数及光谱曲线如图 2 (b) 所示,脉冲宽度为 36 fs,谱宽为 20.5 nm,  $\Delta\tau\Delta\nu = 0.372$ 。此外,锁模范围与图 1 (a) 相比也明显加宽,腔内每个光学元件允许有较大幅度的调整。在没有调谐狭缝的情况下调节棱镜 P<sub>5</sub> 或 P<sub>6</sub>,锁模脉冲在 700~810 nm 波长范围

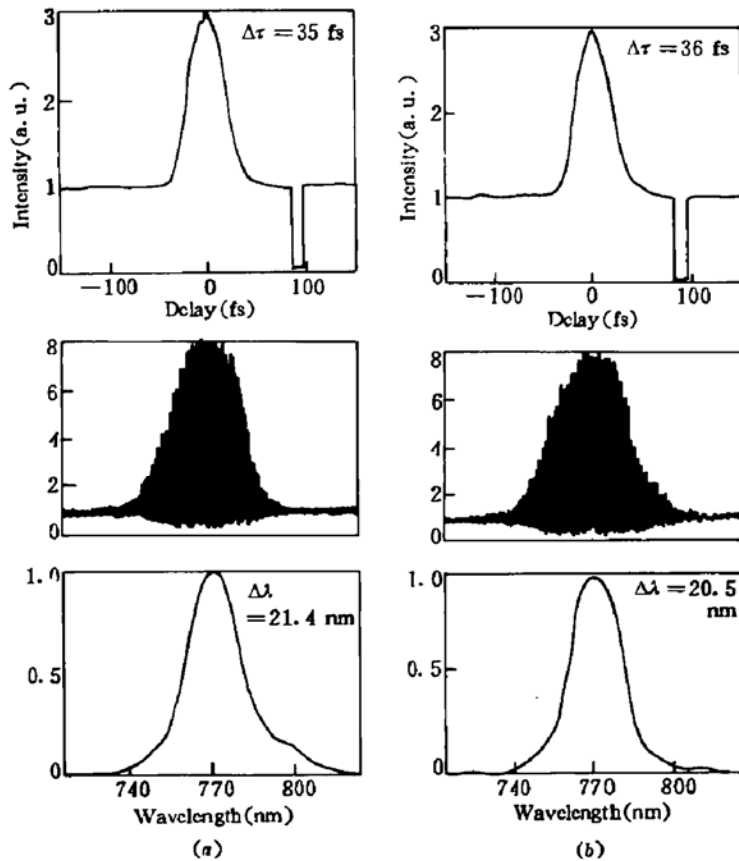


图 2 自上而下表示激光器锁模脉冲的强度自相关函数曲线(3:1),干涉自相关函数曲线(8:1)和相应的光谱曲线

(a) a-型激光器;(b) b-型激光器

Fig. 2 The intensity (3:1) and interference (8:1) autocorrelation traces and the associated spectrum of mode-locked pulses are shown from the above to below, respectively

(a) For laser type -a; (b) For laser type -b

内可调谐。

在不考虑棱镜材料高阶色散的情况下,若晶体中的光脉冲能量密度相同,双向啾啾补偿激光器应该比单向啾啾补偿具有更窄的脉冲宽度。而在本实验中,双向啾啾补偿激光器的锁模脉冲宽度比单向啾啾补偿略宽,主要原因在于新引入的两个棱镜的材料色散起了作用。通过采用相应的措施,如进一步改善腔内色散、提高介质膜片质量,可使双向啾啾补偿自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器既具有低阈值的泵浦功率,又具有更窄的脉冲宽度。

### 3 结 论

实验结果表明,利用双向啾啾补偿方法完善自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器腔内脉冲啾啾补偿,可有效地降低该激光器的泵浦功率阈值,实现稳定的低泵浦自锁模运转。在 Ar<sup>+</sup> 激光泵浦功率仅为 2.4 W 时,获得了 220 mW, 36 fs 锁模脉冲输出,稳定性良好。该方法可应用于其它的自锁模激光器,尤其对于半导体激光泵浦的全固化飞秒自锁模激光器,如 Cr:LiSGAF, Cr:LiSAF 激光器等<sup>[7,8]</sup>,从而在较低的泵浦功率下实现稳定的短脉宽自锁模运转。

### 参 考 文 献

- 1 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, 16(1): 42~44
- 2 M. T. Asaki, C. P. Huang, D. Garrey *et al.*. Generation of 11 fs pulses from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, 18(12): 977~979
- 3 Xing Qirong, Zhang Weili, Lu Wei *et al.*. Experimental study on the self-mode-locked Ti:sapphire laser. *ACTA PHYS. SINICA (Overseas Edition)*, 1996, 5(1): 39~45
- 4 F. Krausz, M. E. Fermann, T. Brabec *et al.*. Femtosecond solid-state laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, QE-28(10): 2097~2122
- 5 邢岐荣,张伟力,李 鹏 等. 采用双石英棱镜对的掺钛蓝宝石自锁模激光器. *光学学报*, 1996, 16(1): 16~19
- 6 J. Herrmann. Theory of Kerr-lens mode-locking; role of self-focusing and radially varying gain. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, 11(3): 498~512
- 7 V. P. Yanovsky, F. W. Wise, A. Cassanho *et al.*. Kerr-lens mode-locked diode-pumped Cr:LiSGAF laser. *Opt. Lett.*, 1995, 20(11): 1304~1306
- 8 J. Falcoz, F. Balembios, P. Georges *et al.*. Self-starting self-mode-locked femtosecond diode-pumped Cr:LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1995, 20(18): 1874~1876

## Two-way Chirp Compensation in a Self-mode-locked Ti:sapphire Laser

Zhang Weili Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The intracavity pulse-chirp compensation has been optimized by introducing two-way chirp compensation in a self-mode-locked Ti:sapphire laser. This allows 36 fs, 200 mW pulses to be generated with a very low pump power of 2.4 W.

**Key words** self-mode-locking, two-way chirp compensation, Ti:sapphire laser