

## 实时显示干涉(8:1)自相关器\*

张伟力 柴路 戴建明 陈野 边自鹏 郑学梅 邢岐荣 王清月

(天津大学精仪学院超快激光研究室 天津 300072)

**提要** 报道了一种可实时测量超短激光脉冲宽度及啁啾特性的干涉(8:1)自相关器。扫描频率为1~20 Hz,测量误差小于3 fs。主要用于自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Cr:LiSGAF 等各种飞秒激光器光脉冲宽度的实时测量。

**关键词** 实时显示,干涉(8:1)自相关,飞秒光脉冲

### 1 引言

自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的出现<sup>[1~3]</sup>带动了飞秒激光在多学科领域超快现象与超快过程的研究中迅速而广泛的应用,同时对于飞秒光脉冲宽度的实时测量技术也提出了新的要求。飞秒光脉冲宽度测量通常所采用的自相关法,是基于迈克尔逊干涉仪,通过记录光脉冲自扫描相关二次谐波曲线来测量其时域宽度。自相关曲线分为强度相关曲线和干涉相关曲线。强度相关曲线是通过记录脉冲自相关强度变化来测量脉冲宽度,而忽略了脉冲位相的变化。干涉相关曲线可显示脉冲自相关过程的每一个光学周期,在记录自相关强度变化的同时也记录了脉冲位相的信息,可更为准确地给出脉冲宽度及啁啾的变化情况<sup>[4~6]</sup>。一般相关器和实时相关器均可记录脉冲的强度自相关曲线,而干涉相关曲线则需要光电探测和记录器件对相关器的扫描速度有足够快的响应,因而实时显示干涉自相关曲线的获得对器件要求较高,是超短脉冲测量的最佳选择。

A. Watanabe 等人<sup>[7,8]</sup>曾报道采用普通扬声器产生时间延迟的实时相关器,其造价低、制作简单,但由于机械和驱动信号精度的限制,只能显示强度相关曲线。张影华等人<sup>[9]</sup>曾报道非共线强度实时自相关器。目前市场上的相关器产品,如 Spectra-Physics 公司和 Femtochrome Research 公司的实时相关器均采用旋转位移方式,只显示强度自相关曲线。本文报道利用特制信号源驱动普通扬声器,产生时间延迟的共线实时相关器,可实时显示飞秒光脉冲的干涉(8:1)自相关曲线,扫描频率为1~20 Hz 可调解,测量误差小于3 fs,同时又可显示强度(3:1)自相关曲线,扫描频率为10~100 Hz。

### 2 工作原理

图1所示为共线自相关器的工作原理图。入射光脉冲经过分束器 BS 变成  $E_1$  和  $E_2$  两束光,

\* 国家攀登计划、国家自然科学基金(69608002)及国家教委回国人员基金资助项目。

收稿日期: 1997-01-23; 收到修改稿日期: 1997-04-25

$E_1$  经  $M_1$  反射,  $E_2$  由动镜  $M_2$  反射产生时间延迟  $\tau$ , 则有  $E_2(t) = E_1(t - \tau)$ 。返回的  $E_1$  和  $E_2$  经分束器后共轴传输, 经透镜  $L$  聚焦在晶体  $C$  上产生二次谐波信号并由光电倍增管 PMT 接收, 然后输入信号记录显示仪器。若

$$E_1 = \varepsilon(t) \cos[\omega t + \varphi(t)]$$

$$E_2 = \varepsilon(t - \tau) \cos[\omega(t - \tau) + \varphi(t - \tau)] = E_1(t - \tau)$$

则脉冲的自相关函数为

$$I_{12}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-\tau}^{\tau} |E_1(t) + E_1(t - \tau)|^2 dt \quad (1)$$

如果入射脉冲为无啁啾的变换极限脉冲, 相位项  $\varphi(t)$  和  $\varphi(t - \tau)$  为常数, 则有  $E_1 = \varepsilon(t) \cos(\omega t)$ ,  $\varepsilon(t) = \varepsilon^*(t)$ 。

当  $\tau = 0$  和  $\tau \rightarrow \pm \infty$  时, 相关函数分别达到极大值  $I_{12}^{\max}$  和背景值  $I_{12}^{\text{back}}$

$$I_{12}^{\max} = 16 \frac{3}{8} \frac{1}{2T} \int_{-\tau}^{\tau} [e^4(t)] dt \quad I_{12}^{\text{back}} = 2 \frac{3}{8} \frac{1}{2T} \int_{-\tau}^{\tau} |e^4(t)| dt \quad (2)$$

且有 
$$\frac{I_{12}^{\max}}{I_{12}^{\text{back}}} = \frac{8}{1} \quad (3)$$

该相关函数所描绘的曲线为干涉自相关曲线, 也称作 8:1 曲线, 如图 2(a) 所示。

当光电响应器件对于动镜  $M_2$  的位移不能作出瞬时响应时, 公式(1)中展开的余弦项由于平均的结果而变为零, 此时

$$\frac{I_{12}^{\max}}{I_{12}^{\text{back}}} = \frac{3}{1} \quad (4)$$

因此该相关函数所描绘的曲线为强度自相关曲线, 也称作 3:1 曲线。

如果相位项  $\varphi(t)$  和  $\varphi(t - \tau)$  不为常数, 脉冲则带有啁啾。对于脉冲带有线性啁啾情况, 假设

$$\varphi(t) = A(t/\tau_r)^2, \quad \varphi(t - \tau) = A[(t - \tau)/\tau_r]^2 \quad (5)$$

其中  $A$  为线性啁啾系数,  $\tau_r$  为脉冲宽度。取  $A = 3$ ,  $\tau_r = 25$  fs, 数值计算的脉冲干涉自相关曲线如图 2(b) 所示, 曲线凸起的部分表明脉冲带有线性啁啾。对于脉冲带有非线性啁啾情况, 假设

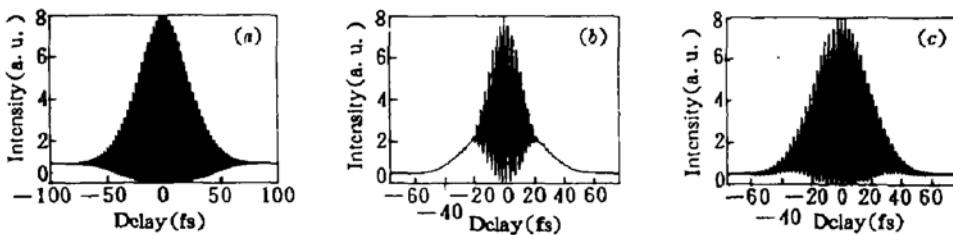


图 2 (a) 无啁啾干涉(8:1)自相关曲线; (b) 带有线性啁啾脉冲干涉自相关曲线; (c) 带有非线性啁啾脉冲干涉自相关曲线

Fig. 2 (a) Chirp-free interferometric (8:1) autocorrelation trace; (b) Interferometric autocorrelation trace with linear pulse chirp; (c) Interferometric autocorrelation trace with nonlinear pulse chirp

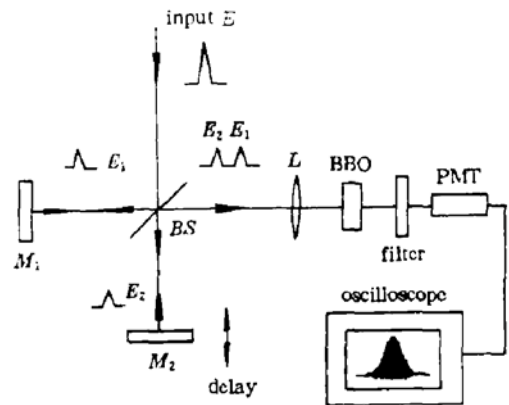


图 1 共线相关器工作原理示意图

Fig. 1 The schematic of the collinear autocorrelator

$$\varphi(t) = \int \frac{2B/\tau_p}{\exp\left[-\frac{2(t-\tau_p)}{\tau_p}\right] + \exp\left[\frac{2(t-\tau_p)}{\tau_p}\right]} dt \quad (6)$$

其中  $B$  为非线性啁啾系数,  $\tau_p$  为脉冲宽度。取  $B = 2.3$ ,  $\tau_p = 25$  fs, 数值计算的脉冲干涉自相关曲线如图 2(c) 所示, 曲线两翼部分表明脉冲带有非线性啁啾。

### 3 相关器指标及结构

相关器指标如下:

测量宽度范围	10 fs~1 ps
光谱响应范围	550 nm~1.5 $\mu$ m
二次谐波晶体厚度	100 $\mu$ m
输入功率	>2 mW
测量误差	<3 fs

相关器采用如图 1 所示的共线结构, 采用低色散光学元件。分束器 BS 分束比为 50/50, 反射镜  $M_1, M_2$  为镀金镜片, 聚焦镜  $L$  为焦距  $f = 3$  cm 的超薄透镜, 二次谐波晶体采用 BBO, 信号接收采用滨松公司 931A 型或 1P21 型光电倍增管。

相关器中的关键元件是能够产生可重复时间延迟的扬声器位移系统。标准的自相关曲线的获得要求动镜  $M_2$  轴向运动均匀且径向无抖动。轴向的非均匀运动可导致相关曲线中光学振荡周期分布不均, 而径向抖动将破坏相关曲线的对称性。本文采用特制的信号发生器产生高信噪比锯齿波驱动扬声器, 反射镜  $M_2$  通过精密机械滑轨与扬声器连接。调节零延时位置于锯齿波的上升沿, 图 3(a) 和 (b) 示意给出相关器在相应时刻显示脉冲的自相关曲线。图 3(c) 为驱动源产生的锯齿波波形照片, 其周期和重复率均连续可调节。

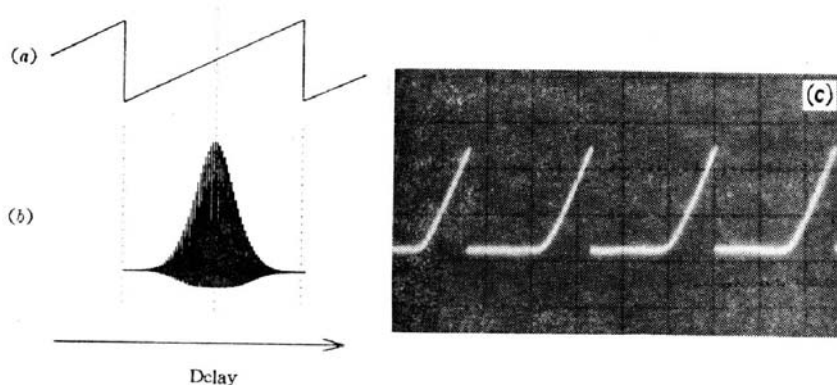


图 3 (a) 信号发生器输出锯齿波示意图; (b) 自相关曲线示意图; (c) 锯齿波照片

Fig. 3 (a) The schematic of sawtooth wave generated from a signal source; (b) Autocorrelation trace; (c) A picture of sawtooth wave (10 ms/div)

### 4 实验结果

利用该相关器对我们的 ULL7840 型自锁模  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  激光器输出的飞秒光脉冲进行了实

时测量实验。图 4 (a) 给出了无啁啾脉冲的干涉自相关函数曲线, 脉冲宽度为 38 fs。

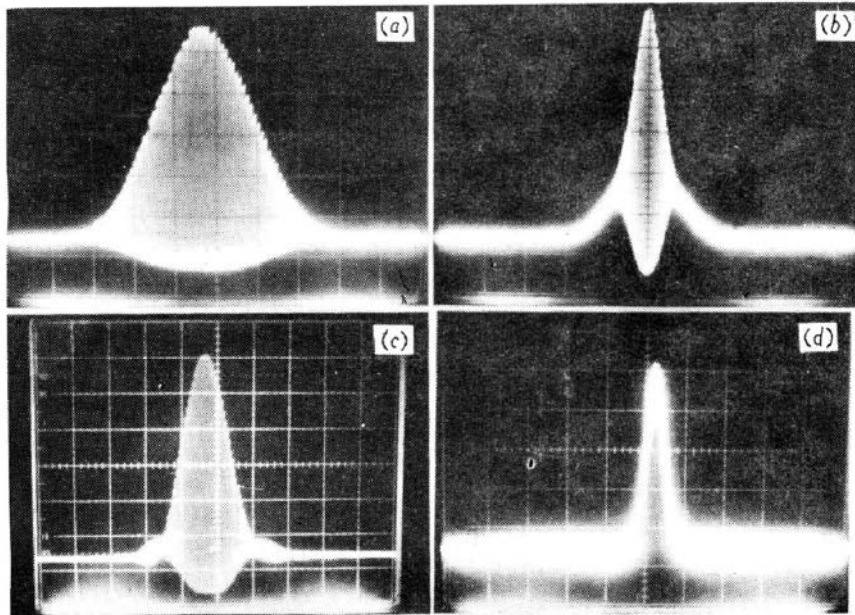


图 4 (a) 无啁啾干涉(8:1)自相关函数实验曲线; (b) 带有线性啁啾的干涉自相关函数实验曲线; (c) 带有非线性啁啾的干涉自相关函数实验曲线; (d) 强度(3:1)自相关函数实验曲线, 80 fs/div

Fig. 4 (a) Experimental chirp-free interferometric (8:1) autocorrelation trace; (b) Experimental linear chirped-pulse interferometric autocorrelation trace; (c) Experimental nonlinear chirped-pulse interferometric autocorrelation trace; (d) Experimental intensity (3:1) autocorrelation trace, 80 fs/div

改变脉冲啁啾, 当公式(1)中的  $\varphi(t)$  和  $\varphi(t - \tau)$  不为常数, 而是时间  $t$  的函数时, 脉冲则具有啁啾。图 4(b) 和(c) 分别给出了带有线性啁啾和非线性啁啾脉冲的干涉自相关函数曲线。曲线凸起的两翼记录了脉冲啁啾的信息, 脉冲宽度均大于 38 fs。

改变相关器的信号输出耦合, 可显示超短脉冲的强度自相关曲线, 如图 4 (d) 所示, 脉冲宽度为 45 fs。强度自相关曲线的重复频率为 10~100 Hz。

进一步减少光学元件色散, 若采用反射球面镜取代聚焦薄透镜, 将二次谐波晶体厚度改为 30  $\mu\text{m}$ , 相关器测量精度可进一步提高。

### 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 王清月, 戴建明, 向望华 等. 掺钛蓝宝石激光器实现飞秒级自聚焦锁模运转. *光学学报*, 1993, 13(2): 93~94
- 3 张影华, 刘玉璞, 赵永华 等. 连续钛宝石激光器自锁模实验研究. *中国激光*, 1994, A21(10): 781~784
- 4 J.-C. M. Diels, J. J. Fontaine, I. C. McMichael *et al.*. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy. *Appl. Opt.*, 1985, 24(9): 1270~1282
- 5 T. Kurobori, Y. Cho, Y. Matsuo. An intensity/phase autocorrelator for the use of ultrashort optical pulse measurements. *Opt. Commun.*, 1981, 40(2): 156~160
- 6 章若冰, 王清月. *激光物理导论*. 天津: 天津大学出版社, 1988, 409~417
- 7 A. Watanabe, M. Hirose, H. Terane *et al.*. Simple real-time monitor of subpicosecond pulses. *Rev. Sci. Instrum.*, 1984, 55(2): 262~263

- 8 A. Watanabe, H. Saito, T. Tokizaki *et al.*. Rapid-scanning autocorrelator with extended scanning span for monitoring short optical pulses. *Rev. Sci. Instrum.*, 1987, 58(10): 1852~1855
- 9 张影华, 傅宝祥, 张国轩 等. 测量飞秒激光脉冲的实时扫描相关器. *中国激光*, 1988, 15(4): 243~245

## A Real-time Interferometric (8:1) Autocorrelator

Zhang Weili Chai Lu Dai Jiaming Chen Ye Bian Zipeng

Zheng Xuemei Xing Qirong Wang Qingyue

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

**Abstract** Based on a commercially available audio speaker a real-time rapid scanning interferometric SHG autocorrelator that may monitor both the pulse-width and frequency sweep in ultrashort laser pulses is reported. The repetition rate of sweeping is 1~20 Hz, and the measurement error is below 3 fs. This apparatus can be used widely for monitoring and measuring interferometric autocorrelation traces of femtosecond pulses generated from self-mode-locked Ti:sapphire laser and those from any other kind of femtosecond pulse lasers.

**Key words** real-time, interference (8:1) autocorrelation, femtosecond pulse