

旋转中空角体棱镜式实时自相关器*

邢岐荣 孙 涛 王明伟 柴 路 张伟力 王清月

(天津大学精仪学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津 300072)

提要 提出并实验研究了采用旋转中空角体棱镜作为光学延迟器的二阶实时光学自相关器。用于飞秒锁模掺钛蓝宝石激光器输出的脉冲测试表明, 该相关器运转稳定、可靠。提出了用计算机对所测相关曲线进行误差补偿的概念。

关键词 飞秒激光, 自相关, 中空角体棱镜, 误差补偿

随着自锁模 $Ti \cdot Al_2O_3$ 激光器的出现及飞秒激光在众多科学领域内的迅速应用, 对飞秒激光脉冲宽度的实时测量技术也提出了新的要求。激光脉冲宽度的测量一般采用的方法有条纹相机法、光学相关法等。条纹相机仅能测量皮秒量级的激光脉冲, 而对于飞秒量级的激光脉冲, 只能采用自相关函数来测量。光学相关器是一改进的迈克尔逊干涉仪, 在其一臂引入可变的光学延迟, 从而测得相关曲线, 由相关曲线推算出被测光脉冲的宽度。利用不同的光学延迟器, 已研制出许多种自相关器, 如转镜式自相关器^[1]、利用普通扬声器产生时间延迟的实时相关器^[2]等。它们普遍存在着机械稳定性不高和调整不便的缺点。本文介绍了一种新型的自相关器, 采用旋转中空角体棱镜为光学延迟器, 利用中空角体棱镜在动态情况下仍使出射光线与入射光线严格保持平行的特点, 使测得的相关曲线更稳定、可靠。并且经过简单的改造, 此相关器既可测量飞秒激光脉冲的无背景强度相关曲线, 又可测量 $8 \cdot 1$ 相关曲线。

相关器中所用光学元件本身的光学特性: 反射率、群速度色散以及于飞秒光脉冲相互作用表现出的非线性效应都将大大影响所测得的相关曲线, 使之偏离被测光脉冲, 造成测量误差。我们把对机械工件测量中的误差补偿概念^[3]用于飞秒光脉冲相关测量, 将相关器中引入测量误差的因素加以分析, 利用计算机对所测相关函数进行补偿修正, 获得了较满意的结果。

1 实验装置

图 1 给出了共线式相关器的原理图。该装置利用偏心旋转的中空角体棱镜(retroreflector) 可获得连续光程变化的特性, 将其作为随时间可变的光学延迟器, 实现对飞秒激光脉冲的实时相关测量。三维中空角体棱镜由三片相互垂直的矩形反射镜组成, 即使在其旋转状态下也可保持入射光方向与出射光方向严格平行。此中空棱镜由一马达驱动, 其中心轴与马达的旋转轴之间有一夹角。当马达转动时, 中空棱镜作偏心旋转, 且其旋转轴与中空棱镜中的入射方向之间也有一夹角。中空棱

* 国家攀登计划部分资助项目。

收稿日期: 1999-05-17; 收到修改稿日期: 1999-07-22

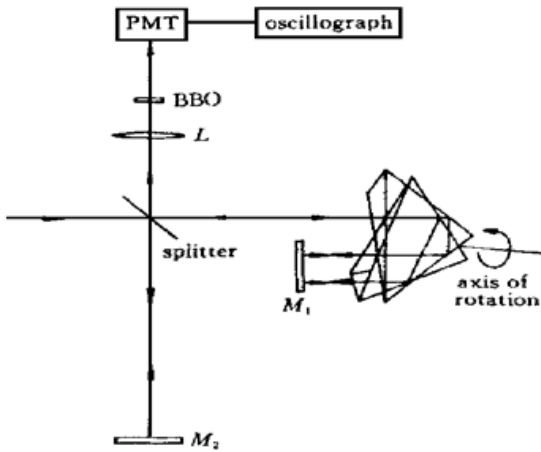


图 1 旋转中空棱镜实时自相关器装置图

Fig. 1 Schematic of real-time autocorrelator with a rotating retroreflector

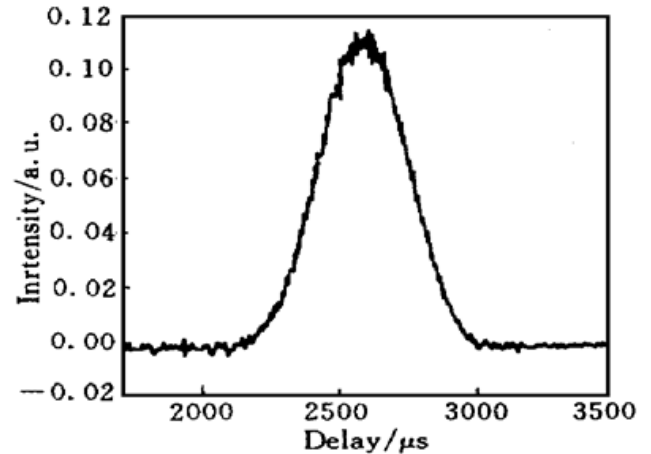


图 2 实验测得的强度自相关曲线

Fig. 2 Experimental intensity autocorrelation trace

镜的偏心旋转使相关器中这一臂的光程产生了连续的变化,其改变量为

$$s(t) = s_0 \cdot \sin \omega t$$

其中 s_0 为光程改变量的幅值, ω 为旋转的角频率。中空棱镜旋转所产生的最大光程差为^[4]

$$s_{\max} = 2s_0 = 8d \sin \theta$$

其中 d 为中空棱镜的顶点(棱镜中三个矩形反射镜的交汇点)到旋转轴的距离, θ 为光轴与棱镜旋转轴的夹角。由 $s(t)$ 表达式可知,中空棱镜旋转所产生的光程改变量呈正弦分布(如图 2)。在实际测量中,要求光程改变率保持一个定值,即只需要光程改变量的线性部分。实验中取了 $-20^\circ < \omega t < +20^\circ$ 和 $160^\circ < \omega t < 200^\circ$ 两段。在 $\omega t = 0^\circ \pm 20^\circ$ 和 $\omega t = 180^\circ \pm 20^\circ$ 处,光程变化量仍保持较高的线性,其偏离线性率小于 1.5%。

如图 1 所示,一束由掺钛蓝宝石自锁模飞秒激光器出射的飞秒激光脉冲经 50% 分束器后分为两束等强度的光束。一束经中空棱镜后,被一全反镜 M_1 原路返回至分束器,另一束激光经反射镜 M_2 原路反射回分束器。这两束光经分束器后共线传输,并由一透镜聚焦于一 BBO 倍频晶体上。若两束光符合相位匹配条件入射,则可产生二次谐波信号,信息经滤光片滤掉基频光后被一光电倍增管接收,并输入到数值示波器(TEK TDS380)中。适当调整参考臂的光程,使两束光脉冲在 BBO 晶体中相互叠加。当中空角体棱镜作偏心旋转时,在示波器上可显示出干涉型相关曲线。这种相关曲线以数据形式存储起来,以备计算机进行数据处理。

对共线式强度自相关仪进行简单的改造,将平面反射镜 M_2 换成一直角反射镜 M_3 ,使入射的这束激光脉冲平行反射回分束器,经分束器后与由另一臂反射回的激光平行传输,这样就构成了非共线式光学自相关器。它可测量无背景强度自相关曲线。

2 实验结果及讨论

图 2 为非共线式相关仪对自锁模 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器输出的飞秒激光脉冲测量的结果。实验中采用的中空棱镜的口径为 5.0 cm,入射光方向与马达旋转轴之间的夹角为 6° ,中空棱镜中心点到旋转轴的距离为 28.7 mm。在 $-20^\circ < \omega t < +20^\circ$ 和 $160^\circ < \omega t < 200^\circ$ 两段,最大光程变化量为 8.2 mm,对应的相关器的最大扫描范围达到 54 ps。马达转速为 4 r/s,透镜 L 的焦距为 5 cm, BBO 晶体的厚度为 100 μm 。

为了从图 2 的相关曲线中读出输入光脉冲的宽度, 需对相关器进行标定。我们采用了实验定标的方法。用螺旋测微器改变非延迟臂的光程, 使自相关曲线在示波器上发生平移, 从光程的改变量与曲线的平移量之间的关系中可以标定出标定系数 A 。实验中测得 $A = 0.20916 \text{ fs}/\mu\text{s}$ 。图 3 中自相关曲线的半宽度约为 $400 \mu\text{s}$, 对应的激光脉冲的半宽度 $\Delta t = 53.97 \text{ fs}$ 。

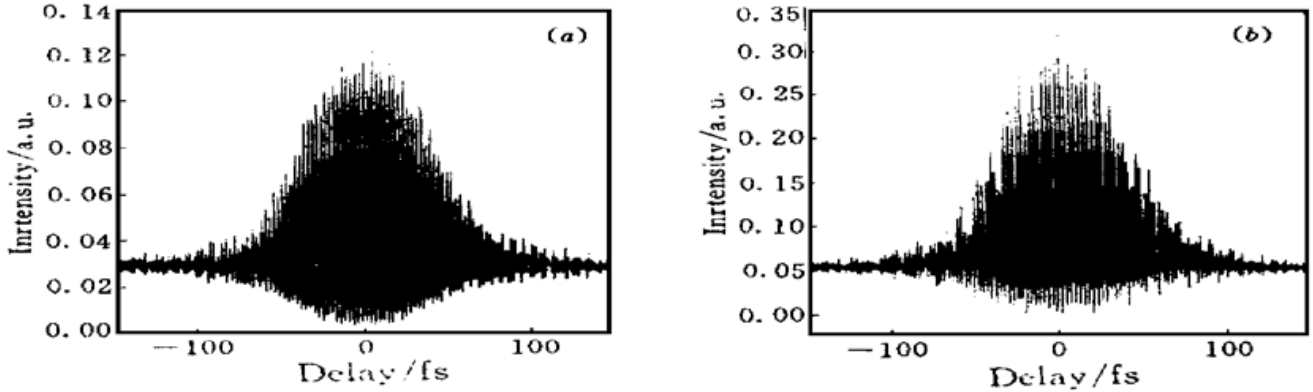


图 3 (a) 实验测得的干涉型相关曲线; (b) 修正后的干涉型相关曲线

Fig. 3 (a) Experimental interferometric (8·1) autocorrelation trace;

(b) The interferometric (8·1) autocorrelation trace after error compensation

图 3 (a) 为共线式相关仪对自锁模 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器输出的飞秒激光脉冲测量的结果。从图上可以看到, $\tau = 0$ 和 $\tau \rightarrow \pm \infty$ 时的信号强度比不是 8·1, 而是 5·1。这主要是因为装置中经过两臂后入射到 BBO 晶体的两束光的强度不一致所造成的(实验时测得这两束光的强度比为 3·1)。造成两束光强度不一致的原因是因为两束光所经历的反射次数不同, 而光路中的反射镜为镀金镜, 反射率不是 100%。造成相关曲线偏离 8·1 的原理简单分析如下:

设经过相关仪后, 从两臂出射的光的光强比为 $1 \cdot a$, 则这两束光可记为

$$E(t) = E_0(t) \cos[\omega t + \mathcal{Q}(t)]$$

$$E(t - \tau) = \sqrt{a} \cdot E_0(t - \tau) \cos[\omega(t - \tau) + \mathcal{Q}(t - \tau)]$$

其中, τ 为两光脉冲序列的相对延迟时间, 它是个变量。共轴传输的两束激光脉冲经一透镜 L 聚焦于非线性晶体 BBO 上, 产生的二次谐波信号为

$$\begin{aligned} S(\tau) &= A \int \{ [E(t) + E(t - \tau)][E^*(t) + E^*(t - \tau)] \}^2 dt = \\ &A \int \{ E_0^4(t) + a^2 \cdot E_0^4(t - \tau) + 4a \cdot E_0^2(t)E_0^2(t - \tau) + 4[E_0^2(t) + a \cdot E_0^2(t - \tau)] \times \\ &a^{1/2} \cdot E_0(t)E_0(t - \tau) \cos[\omega t - \mathcal{Q}(t) + \mathcal{Q}(t - \tau)] + 2a \cdot E_0^2(t)E_0^2(t - \tau) \times \\ &\cos^2[\omega\tau - \mathcal{Q}(t) + \mathcal{Q}(t - \tau)] \} \end{aligned}$$

若驱动中空棱镜 R 的马达转动速度较慢, 使光电倍增管及示波器能对上式中的位相项 $\cos[\omega\tau - \mathcal{Q}(t) + \mathcal{Q}(t - \tau)]$ 及 $\cos^2[\omega\tau - \mathcal{Q}(t) + \mathcal{Q}(t - \tau)]$ 做出瞬时响应, 则示波器上显示的曲线是包含位相项的干涉型相关函数曲线。当 $\tau = 0$ 和 $\tau \rightarrow \pm \infty$ 时, 相关函数分别达到极大值 S_{\max} 和背景值 S_{back} 。其中

$$S_{\max} = (1 + 4a^{1/2} + 6a + 4a^{3/2} + a^2) \cdot A \int E_0^4(t) dt$$

$$S_{\text{back}} = (1 + a^2) \cdot A \int E_0^4(t) dt$$

$$\text{且} \quad S_{\max}/S_{\text{back}} = (1 + 4a^{1/2} + 6a + 4a^{3/2} + a^2)/(1 + a^2) \quad (1)$$

当 $a = 1$ 时, $S_{\max} = 16A \int E_0^4(t) dt$, $S_{\text{back}} = 2A \int E_0^4(t) dt$, 且 $S_{\max}/S_{\text{back}} = 8 \cdot 1$, 因此该相关函数所描绘的曲线称为 $8 \cdot 1$ 曲线。在实验中测得 $a = 3$, 此时 $S_{\max}/S_{\text{back}} = 5.57$, 未达到 $8 \cdot 1$, 和实验中得到的相关曲线一致。

为了消除两臂光强不同的影响, 可借用机械测量技术中常用的误差补偿的概念^[3], 即用计算机等工具对实验结果进行修正, 将由已知的误差源所产生的误差消除。将从数字示波器上得到的曲线数据输入计算机, 找出其极大值, 并以此点为零延时位置 ($\tau = 0$)。由于数字示波器的取样点是均匀分布的, 所以对于曲线中的任一点可以很容易地得到其相对于零延时点的相对延时量 τ 。由 (1) 式可以求得此时两臂光强比为 $1 \cdot 1$ 时和 $a \cdot 1$ 时的二次谐波信号强度 $S(\tau)$ 和 $S'(\tau)$ 。定义修正因子 $v = S(\tau)/S'(\tau)$, 并用它乘以实验曲线中此点对应的二次谐波信号强度就可得到一个修正值。将实验曲线逐点进行修正后, 就可消除两臂光强不等对测量结果的影响, 使相关曲线的 S_{\max}/S_{back} 恢复到 $8 \cdot 1$ 。由图 3(b) 可以看出, 已达到相当好的修正效果。

3 结 论

我们提出了一种新颖的测量飞秒激光脉冲宽度的自相关器。它是利用旋转的中空棱镜来获得光学延迟的。利用它既可获得飞秒光脉冲的相干 $8 \cdot 1$ 相关曲线, 并且经过简单改进后还可获得无背景的信号相关曲线。实验发现若由相关器中两臂出射的两束光的光强不等时, 可造成 $8 \cdot 1$ 相关曲线的最大值与背景值的比值不到 $8 \cdot 1$ 。本文提出了用计算机对所测相关曲线进行误差补偿的概念, 对实验曲线进行了修正, 并取得了较好的结果。利用光学自相关器, 对自锁模掺钛蓝宝石激光器输出的飞秒光脉冲进行实验测试, 结果表明, 该相关器简单、稳定、可靠、实用。

参 考 文 献

- 1 Z. A. Yasa, N. M. Amer. A rapid-scanning autocorrelation scheme for continuous monitoring of picosecond laser pulses. *Opt. Commun.*, 1981, **36**(5): 406~ 408
- 2 Zhang Weili, Chai Lu, Dai Jiaming *et al.*. A real-time interferometric ($8 \cdot 1$) autocorrelator. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(10): 915~ 919 (in Chinese)
- 3 G. Zhang *et al.*. Error compensation of coordinate measuring machines. *The Annals of CIRP*, 1985, **34**(1): 445~ 448
- 4 P. Haschberger, V. Tank, F. Lanzl. Michelson interferometer with a rotating retroreflector: investigations on special features. *Infrared Phys.*, 1991, **31**(4): 351~ 360

A Real-time Autocorrelator with a Rotating Retroreflector

Xing Qirong Sun Tao Wang Mingwei Chai Lu Zhang Weili Wang Chingyue
(College of Precision Instrument of Optoelectronics Engineering, Tianjin University,
Optoelectronics Information Science and Technology Lab., MOE, Tianjin 300072)

Abstract A new type of autocorrelator with a rotating retroreflector is reported. Optical path length alteration is produced by introducing a rotating retroreflector into one arm of autocorrelator. It can be used to realize the real-time monitoring and measurement of femtosecond laser pulses. The conception of error compensation is introduced in autocorrelation measurement, and the interferential correlation curve is corrected with a computer.

Key words femtosecond laser, autocorrelation, retroreflector, error compensation