

转镜式快速扫描自相关器的研究

徐文成 丘志仁 林位林 余振新

(中山大学激光与光谱学研究所, 广州)

摘要: 本文描述一种用于飞秒激光脉冲宽度测量的自相关装置。它可令光脉冲产生周期性的时间延迟。借助于示波器, 可以显示出激光脉冲强度的二次相关曲线, 从而实现了对周期性飞秒脉冲宽度的实时快速监测。

A rapid-scanning and real-time autocorrelator incorporating a rotating mirror

Xu Wengcheng, Qiu Zhiren, Lin Weizhu, Yu Zhenxin

(Laser Optics and Spectroscopy Institute, Zhongshan University)

Abstract: A rapid-scanning autocorrelator introducing a periodic linear time delay to a train of picosecond and femtosecond laser pulses is described. The second order intensity autocorrelation of the pulse train is then continuously displayed on an oscilloscope to realize rapid monitoring and measurement of the laser pulses in real-time.

一、引言

随着超短脉冲研究的发展, 特别是碰撞脉冲锁模染料激光器的出现, 激光脉冲已进入飞秒(fs)时域。测量飞秒激光脉冲宽度的标准方法是采用众所周知的自相关技术^[1], 然而, 最初使用的方法, 需要花费相当时间才能获得一条完整的自相关曲线, 在实验使用上很不方便。因此有必要研制一种能够实时连续地监测激光脉冲时间特性的装置。途径之一是在迈克尔逊干涉仪的一臂放入某一能使时间产生周期性延迟的装置。在这方面, 以往报道很多, 其中时间延迟有线性的, 也有非线性的^[2,3]。

本文将介绍一种结构简单、调整方便而又能测量飞秒光脉冲宽度的转镜式扫描自相关器, 它具有测量分辨率高、速度快、无色散和无本底等特点。

二、原理与设计

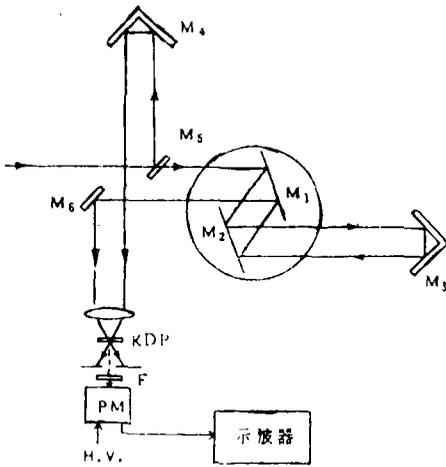


图1 快速扫描自相关装置示意图

图1绘出了扫描自相关装置。 M_1 和 M_2 构成的平行镜组置于一个同步马达上，位于50%的分束镜 M_5 与组合反射器 M_3 之间。马达以每分钟1500转的角频率转动。分束器将激光束分为两束，第一束经反射镜 M_1 、 M_2 ，再经 M_3 ，组合反射器反射回来；第二束由组合固定反射器 M_4 反射。 M_3 、 M_4 组合反射器由两个彼此相互垂直的平面镜构成，这样可以使入射方向相反的方向反射回去。当转镜转动一 θ 角度时，光程会发生变化。从 M_3 和 M_4 反射来的光束由透镜聚焦于非共线匹配的厚度为0.3mm非线性晶体KDP上并产生二次谐波信号。这一信号可由光强的二次相关函数 $s(\tau)$ 表示：

$$s(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(t)I_2(t+\tau)dt \quad (1)$$

式中， τ 是第一光束 $I_1(t)$ 相对于第二光束 $I_2(t)$ 的时间延迟。二次谐波信号由光电倍增管PM接收后送至示波器显示。示波器的触发脉冲取自转镜反射出来的光信号，以确保扫描的同步。由于 M_1 镜和 M_2 镜是严格平行的，其转动只引起 $I_2(t)$ 光束的光程变化，也即产生时间延迟。这样，示波器直接显示了激光脉冲的二次强度相关曲线。若假定被监测的飞秒脉冲光强分布是双曲正割形，即 $I(t) \propto \text{sech}^2(1.76t/\Delta t)$ ， Δt 为脉冲的全半宽度，由(1)式可求得 $\Delta\tau/\Delta t = 1.55$ ，其中 $\Delta\tau$ 是自相关曲线的全半宽度，这样，由示波器显示的 $\Delta\tau$ 便可以测定光脉冲的宽度 Δt 。

当 M_1 、 M_2 镜组转动 θ 角时，经过它的光束 $I_2(t)$ 将产生光程变化，如图2所示。分析其几何图形，不难得到下列关系式^[2]：

$$\Delta l = 2(l_1 - l_2) = 2(AB + BD + DE + EG - AF) = 2\left\{ \frac{\sin 2\theta}{\sin 2\psi} \cdot \frac{h}{\sin(\psi + \theta)} + \frac{h}{\sin(\psi + \theta)} + \frac{\cos 2\psi}{\sin 2\psi} \left[(2h\cos\psi - \cos(\psi + \theta)) \right] - \frac{h}{\sin\psi} \right\} \quad (2)$$

化简得：

$$\Delta l(\theta) = 4h(\cos\psi\sin\theta - 2\sin\psi\sin^2\frac{\theta}{2}) \quad (3)$$

式中， h 是平行镜 M_1 与 M_2 的距离； ψ 是光束入射 M_1 镜的掠射角； $\Delta l(\theta)$ 表示当转镜转动 θ 角度时该光束光程的变化。当 $\theta \ll \pi/2$ 时

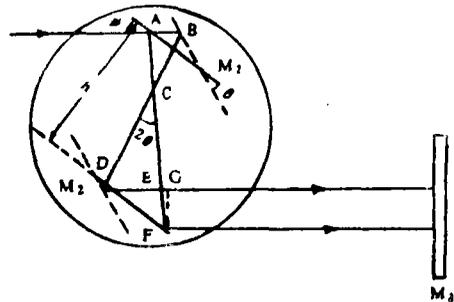


图2 自相关器转镜部分
 h —镜间距离

$$\Delta l(\theta) = 4h\theta \left(\cos\psi - \frac{\theta}{2} \sin\psi \right) \quad (4)$$

选取 $\psi = \pi/4$, 得:

$$\Delta l(\theta) = \sqrt{2} \theta h \theta \left(1 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 光程变化量或者自相关器的扫描范围决定于转镜的距离 h 和转动的角度 θ 。当 h 足够大时, 最大的转角 θ_{max} 取决于转镜 M_1 和 M_2 的横向尺寸。一般这一自相关器的扫描范围可达到几十皮秒。扫描范围越大, 转角 θ 便越大 (h 值一定), $\Delta l(\theta)$ 的非线性量随之增大, 自相关曲线会产生严重失真, 这是要注意避免的。

定义非线性量度 NL 为 (5) 式中 θ^2 项与 θ 项之比, 即:

$$NL = -\theta/2 \quad (6)$$

负号表示光程变化的线性量值比实际光程的变化要大。若希望装置的非线性量 $|NL|$ 最大不超过 1%, 则转镜旋转时的角度 θ 必须满足: $\theta \leq 0.02 \text{ rad}$ 。

设计本实验装置的目的是为了实时监测飞秒激光脉冲, 若需要最大扫描范围为 3ps, 则要求镜间距离 h 至少为: $h = \Delta l(\theta) / 2\sqrt{2}\theta = 16 \text{ mm}$ 。本实验装置选择 $h = 17 \text{ mm}$, 这样在 3ps 的扫描范围内, 能保证非线性量 $|NL|$ 最大不超过 1%。

由上面分析可知, 在上述扫描范围内, 转角 θ 很小, 可略去 (5) 式中 θ^2 项, 得:

$$\Delta l(\theta) = 2\sqrt{2} h\theta \quad (7)$$

由于转镜匀速转动, 应该有 $\theta = 2\pi ft$, 这样:

$$\Delta l(t) = 4\sqrt{2} \pi h f t \quad (8)$$

式中, $2\pi f$ 是角频率。(8) 式表明, 光束产生的光程变化 $\Delta l(t)$ 与时间 t 成线性关系 (当 θ 角很小)。

三、实验结果和讨论

转镜式扫描自相关器特别适用于连续锁模染料激光器的调整和实时监测脉冲宽度。图 3 是我们测量 CPM 染料激光器输出脉冲时所获得的自相关曲线。

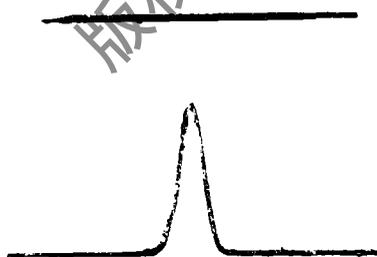


图3 快速扫描自相关曲线
水平标度为 $5\mu\text{s}/\text{格}$, 垂直
标度为冲波形 $50\text{mV}/\text{格}$,
假设脉为双曲正割 sech^2 ,
得到脉冲全半宽度为 64fs

为了由自相关曲线求出光脉冲宽度, 必须由自相关器进行时标校正。自相关的校正是采用改变组合反射器 M_4 的位置的方法。当 M_4 组合反射器向前移动一距离 ΔL 时, 自相关器两臂的光程差为 $2\Delta L$, 由此所产生的自相关信号的峰值便相对于移动前的峰值在时基上后退了 $2\Delta L/c$, 这样, 由实验测定组合镜 M_4 的移动量 ΔL 与示波器上自相关曲线峰值的时基位移量间的关系, 便可获得时标校正参量。

实验测定 M_4 组合镜移动量 $\Delta L = 0.60 \text{ mm}$ 时, 自相关曲线峰值的时基位移为 $160\mu\text{s}$, 这样可以求得校正参量 A 。

$$A = \frac{2\Delta L}{c \times 160\mu s} = 25\text{fs}/\mu s$$

在图3上, 自相关曲线全半宽度对应的时基宽度为 $4\mu s$, 由校正参量 A 即可算得光脉冲的全半宽度为:

$$\Delta\tau = 25\text{fs}/\mu s \times 4\mu s = 100\text{fs}$$

假设脉冲为双曲正割波形, 则光脉冲全半宽度的修正值应为:

$$\Delta t = \Delta\tau/1.55 = 64\text{fs}$$

为了比较, 我们另外用慢扫描自相关器测量自相关曲线的全半宽度。慢扫描相关器是采用精密微动导轨(由步进马达驱动)作光延迟, 用光电倍增管接收二次谐波并经锁相放大器后进行记录。它能够精确地测定出自相关曲线作为光延迟的函数, 并由此换算得脉冲的全半宽度(见图4): $\Delta t' = 60\text{fs}$ 。可以看出, 两种光延迟技术装置测量所得的结果大致相同。然而, 用慢扫描相关器测量记录一条曲线需要几十秒时间, 而快速扫描相关器则可以在 1s 内扫描 $1500/60 = 25$ 次, 从而大大地缩短了测量时间, 这在调整连续锁模激光器时用作波形监测是非常方便的。

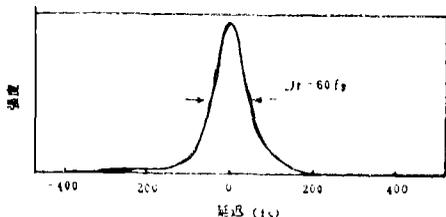


图4 慢扫描自相关曲线

假设脉冲波形是双曲正割 sech^2 , 得到脉冲全半宽度为 60fs

与其输入端的时间常数有关, 时间常数 T 由输入阻抗和容抗决定, $T = RC$ 。示波器输入电容 C 约为 30pF , 负载电阻 $R = 1\text{k}\Omega$, 则 $T = RC = 30 \times 10^{-12} \times 10^3 = 0.03\mu s$, 此时间常数小于所要求的响应时间。从上面的分析可以看出, 本实验装置的探测和显示部分能保证仪器的测量精度达到 1fs 。

飞秒级光脉冲的光谱相当宽, 所以必须考虑自相关器系统中各个光学元件色散引起的脉冲加宽或压缩效应带来的测量误差。自相关器的光学元件主要有分束镜、反射镜、聚焦镜和倍频晶体等。为了减少群速度色散的影响, 所有反射镜都采用中性铝反射膜。这样, 光学元件引起的色散主要来源于分束镜、聚焦镜和倍频晶体。

考虑全半宽度为 Δt 的高斯型激光脉冲 $I(t) = \exp\left\{-\frac{(4\ln 2)t^2}{(\Delta t)^2}\right\}$, 射入长度为 L 的色散介质后, 脉冲的宽度由下式给出^[4]:

$$\Delta t' = \Delta t [1 + (T_c / \Delta t)^2]^{1/2} \quad (9)$$

式中, T_c 称为色散介质的特征宽度,

$$T_c = 2 \left(\frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \cdot L \cdot \ln 2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

表1 特征值 T_c 。

L	T_c [BK7] (fs)	T_c [KDP] (fs)
100 μ m	4.1	5.4
300 μ m	7.2	9.3
500 μ m	9.3	12
1mm	13	17
3mm	22.5	29.5
1cm	47	54

晶体、透镜和分束镜的厚度分别为0.3mm、3mm和1mm。取 $\Delta t = 60$ fs, 则由光学元件色散引起的脉冲加宽总量约为1fs, 因此, 本实验装置的光学元件色散引进的测量误差约为2%。

式中, λ 是激光波长; c 是光在真空中的速度; n 是色散介质的折射率。不同长度的BK7玻璃、KDP晶体的 T_c 值列于表1。根据表1和关系式(9)、(10)可以求得不同长度 L 的色散介质BK7玻璃、KDP晶体所引起的脉冲加宽。当激光脉冲全半宽度 Δt 与 T_c 相当或者小于 T_c 时, 色散介质引起的脉冲加宽效应显著, 此时的测量误差大。因此, 要测量飞秒级的激光脉冲应采用足够薄的倍频晶体、透镜和分束镜。本实验装置采用的倍频

参 考 文 献

- [1] Weber H P, J.A.P., 1969; 38; 2231
- [2] Zafer A YASA, Nabil M AMER, Opt. Commun., 1981; 36(5); 406
- [3] 张影华等, 中国激光, 1988; 4; 243
- [4] Jean-Claude M Diels, Jod J Fontaine, Lan C McMichael et al., Appl. Opt., 1985; 24; 1270

作者简介: 徐文成, 男, 1965年11月出生。硕士研究生。现从事超短脉冲激光技术及其在半导体和其它凝聚态物质超快特性研究中的应用。

收稿日期: 1990年1月17日。

· 简 讯 ·

第四届全国量子光学学术会在蓉召开

成都市激光学会受中国光学学会激光专业委员会的委托, 筹备和组织了第四届全国量子光学学术会议, 1990年11月21日至24日在成都电子科技大学召开, 来自全国各省、市、自治区的科研、院校共34个单位82名代表参加了会议, 其中教授9人, 副教授19人, 研究生23人。会议收到论文98篇, 在大会上报告79篇, 其中有7篇特邀报告。

会议广泛地交流了国内量子光学领域的科研成果。内容丰富, 学术水平较高, 有些成果达到了国际水准。更令人可喜的是一批年轻的研究生活跃在这个领域, 并作出了不少有意义的工作, 使国内量子光学研究队伍更充满了朝气和活力。

会议安排紧凑, 卓有成效, 始终洋溢着老中青科技工作者团结合作, 互相学习的热烈气氛。

(本刊通讯员 供稿)