

文章编号: 0258-7025(2004)01-0111-04

# 超短脉冲激光测量的标定方法

刘天夫<sup>1</sup>, 余卫龙<sup>2</sup>, 丘志仁<sup>2</sup>, 彭文基<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量学院, 浙江 杭州 310034; <sup>2</sup> 中山大学超快激光光谱学国家重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要** 在研究总结现有超短激光脉冲测量方法的基础上,对皮秒激光脉冲的测量及飞秒激光脉冲自相关二次谐波(SHG)的测量方法进行了统一的校正。实验中,利用迈克尔逊干涉光路的相对光程差,产生已知时间间隔,作为时间基准对皮秒、飞秒激光脉冲的测量进行了标定。

**关键词** 光学技术与仪器;超短激光脉冲;标定;迈克尔逊干涉仪;自相关二次谐波;条纹相机

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Calibration Method for the Measurement of Ultrashort-pulsed Lasers

LIU Tian-fu<sup>1</sup>, SHE Wei-long<sup>2</sup>, QIU Zhi-ren<sup>2</sup>, PENG Wen-ji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Institute of Metrology, Hangzhou, Zhejiang 310034, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Ultra fast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China

**Abstract** The commercial picosecond measurement instrument and autocorrelation second harmonic generation (SHG) measurement method have been uniformly calibrated in this paper, which is based on the summary of the present ultrashort laser pulse measurement method. In this experiment, the known delay, which is used as time criteria for calibration of instrument, was generated by the relative optical path difference of Michelson interference light path.

**Key words** optical technique and instrument; ultrashort laser pulse; calibration; Michelson interferometer; autocorrelation second harmonic generation; streak camera

## 1 引言

随着超短激光脉冲技术的飞速发展,它的应用愈来愈受到国内外许多领域的高度重视。例如,在通信领域利用飞秒技术实现超高速光通信;在生物医学领域利用飞秒光源实现光学相干的断层扫描仪,能够精确地观测活体细胞的三维图像<sup>[1]</sup>;在物理、化学研究领域,用皮秒、飞秒激光光谱技术进行超快过程研究<sup>[2]</sup>;在新能源领域,利用高能量的飞秒脉冲激光与等离子体相互作用,可产生高次谐波辐射以及相干 X 射线,并可望实现受控核聚变<sup>[3]</sup>。此外,在精密机械加工等诸多领域,超短激光脉冲技术也同样倍受瞩目。因此,对皮秒、飞秒量级光脉冲的测量迫切需要精确、可靠而又统一的标准计量方法。本文采用迈克尔逊干涉光路,以光速  $c$  为常量,产生

已知相对光程差作为统一的时间基准,对超短激光脉冲的测量进行了标定。

## 2 超短激光脉冲测量的标定

利用相关法进行超短激光脉冲的测量时,对测量结果的准确性、可靠性的评估是十分重要的。目前,国内外对超短激光脉冲的测量还没有一个统一的标准计量方法。因此,必须在超短激光脉冲测量技术领域,尽快建立起科学、统一的标准校正方法,提高测量精度,实现测量结果的一致性和可靠性。

### 2.1 皮秒量级激光脉冲测量的标定方法

由于条纹相机比高速采样示波器的标定方法复杂,因此下面以条纹相机的标定为例进行说明。利

收稿日期:2002-05-31;收到修改稿日期:2002-12-11

作者简介:刘天夫(1945—),男,中国计量学院信息工程系教授,主要从事超快激光光谱、光电探测技术研究。E-mail: tf-liu@mail.cn

用迈克尔逊干涉仪产生两臂光程差,得到已知延迟时间间隔的双脉冲光作为校正用的基准时间间隔。由于空气介质中,1 ps 的光程为:光速×时间≈0.3 mm,因此当改变迈克尔逊干涉仪两臂的光程差时,原则上可以产生连续可变的标准间隔双脉冲。但是,由于机械精度及调整方面的困难,实验中用已知材料及几何厚度的平面透镜,插入迈克尔逊干涉仪的一臂中作为校正用的标准时间间隔。同时,采用100~200 ps 标准具实现对条纹相机扫描线性度的标准校正。整个实验装置如图1所示。

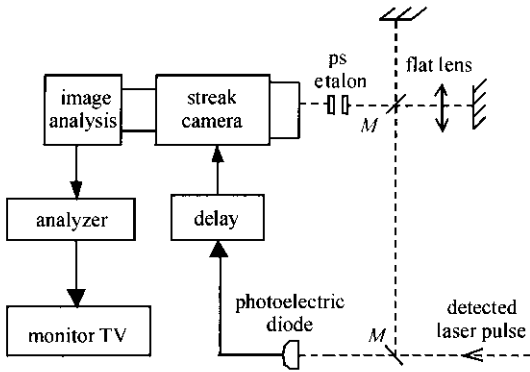


图1 皮秒条纹相机标定实验框图

Fig. 1 Experimental setup for demarcating picosecond streak camera

由于迈克尔逊干涉仪两臂调整不等及光分束镜所引起的光程差,使干涉仪输出具有不确定的时间间隔。但是,由于把平面透镜M的延迟时间作为校正用基准时间,因此上述时间间隔的不确定,对实验结果没有直接影响。首先需要测量迈克尔逊干涉仪的双脉冲间隔,同时为了弄清干涉仪两个臂输出光脉冲的先后次序,在非校正臂上插入了一个光阑限制光束的大小,从而得到空间的短像,据此可以确定两臂光路相对位置。

由于平面透镜的几何尺寸及材料为已知,光脉冲通过它的往返时间由公式  $\Delta t = 2hn/c$  (其中  $h$  为平面透镜厚度,  $n$  为材料的折射率) 可以精确算出,并用它作为基准时间进行校正。将平面透镜分别置于迈克尔逊干涉仪两臂的光路中,由此可以测得迈克尔逊分束镜的延迟时间,这样就可以精确地得到迈克尔逊输出像的时间间隔,并以此对条纹相机各扫描档读数进行标准校正<sup>[4]</sup>。

为检测条纹相机高压扫描线性区的工作情况,在迈克尔逊干涉仪输出端插入一个使基准双脉冲串延迟时间为100~200 ps 的标准具,从而可以方便地检测条纹相机高压扫描线性区工作情况。

## 2.2 飞秒量级激光脉冲测量的标定方法

目前,对于飞秒量级激光脉冲的测量方法主要有两种。一种是自相关二次谐波(SHG)法,另一种是双光子荧光(TPF)法。这两种方法的测量原理都是基于光与物质相互作用的非线性特性,通过测量被测光脉冲自相关的二次谐波曲线,间接地得到被测脉冲的宽度。由于通过计算间接得到测量结果,因此对于飞秒激光脉冲测量的精确标定,几乎是不可能的。但是,根据目前测量技术的水平,可以规定步进电机转动的步距角度,并采用精度较高的丝杆导轨的迈克尔逊干涉光路系统进行测量。由于丝杆导轨每前进一步的距离能够容易地达到纳米量级,因此,可以利用步进长度作为测量系统的时间校正基准,从而达到飞秒测量结果的相对准确和一致性。

目前,对于单个、不重复或重复频率较低的飞秒激光脉冲的测量,主要采用 TPF 法,对于它的标定,采用标准平面透镜或设计已知延迟时间间隔光路,利用介质中脉冲之间群速度差来判读定标用的基准时间,用这种方法对测量结果的校正是方便可行的<sup>[5]</sup>。对于重复频率较高的飞秒激光脉冲的测量,主要采用自相关 SHG 法。对于它的测量与标定,同样使用迈克尔逊干涉仪完成,其装置如图2所示。所用倍频晶体 KDP 的厚度为 100 μm,  $M_2$  为固定的全反射棱镜,  $M_1$  为光延时用的全反射棱镜,并可在高精度丝杆导轨上滑行,它由计算机控制的步进电机带动,步进电机的步距角为 1.5°/步,步进电机转一圈(360°),导轨前进 0.01 mm。因此,在一个电脉冲驱动下电机每转进一步,丝杆导轨平均前进的距离为  $0.01 \text{ mm} \times 1.5/360 = 0.042 \mu\text{m}$ ,在空气中相当于光学延迟量约为 0.28 fs,这样的延迟时间间隔足以满足飞秒测量的标定基准。对于每一个 0.28

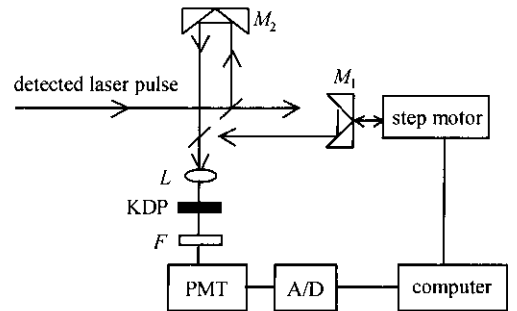


图2 共轴结构的自相关二次谐波法测量飞秒激光脉冲宽示意图

Fig. 2 Schematically diagram of measuring femtosecond pulse width with collinear structure autocorrelation second harmonic

$f_s$  的延迟,步进电机的转动速度是足够慢的,因此光电探测器完全可以测出该点对应的自相关 SHG 的强度值大小,并由计算机控制的 12 位 A/D 变换器进行数据采集存贮与处理,最后得到被测光脉冲自相关二次谐波  $G^{(2)}(\tau)$  的完整曲线,结果如图 3 所示。它的工作过程可说明如下。

设共线进入倍频晶体 KDP 之前的两个光脉冲的电场强度是

$$E_1(\omega, t) = \epsilon(t) e^{j[\omega t + \phi(t)]} \quad (1)$$

$$E_2(\omega, t - \tau) = \epsilon(t - \tau) e^{j[\omega(t - \tau) + \phi(t - \tau)]} \quad (2)$$

式中  $\tau$  表示迈克尔逊干涉仪的两个光脉冲之间的相对延迟,  $\phi(t)$  表示因非线性引起的光场的位相随时间的变化。倍频后的光场可以表示为

$$E(2\omega, t) \propto [E_1(\omega, t) + E_2(\omega, t - \tau)]^2 \quad (3)$$

因为光电探测器的响应时间远远慢于被测光脉冲的脉宽,所获得的只能是倍频光的平均值

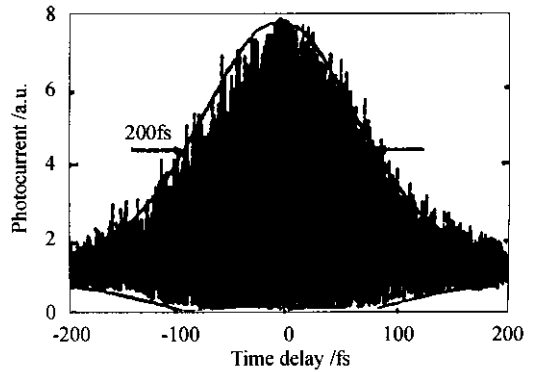


图 3 共线情况下测得的自相关二次谐波曲线  
Fig. 3 Profile of autocorrelation second harmonic at collinear case

$$S(\tau) = A \int_{-\infty}^{+\infty} E(2\omega, t) \times E^*(2\omega, t - \tau) dt = B \left\{ \frac{1 + 2G^{(2)}(\tau) + \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} 2[\epsilon^2(t) + \epsilon^2(t - \tau)] \epsilon(t) \epsilon(t - \tau) \cos[\omega\tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)] dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^4(t) dt}}{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^2(t) \epsilon^2(t - \tau) \cos^2[\omega\tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)] dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^4(t) dt}} \right\} \quad (4)$$

其中

$$B = 2A \int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^4(t) dt, \quad G^{(2)}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^2(t) \epsilon^2(t - \tau) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^4(t) dt}$$

(4) 式中  $A$  为常数,  $G^{(2)}(\tau)$  为自相关二次谐波强度波形, 它可以用图 2 所示的实验装置测得。我们的标定, 实际上是对自相关二次谐波  $G^{(2)}(\tau)$  曲线宽度测量的标定。由图 3 可知,  $G^{(2)}(\tau)$  的半高全宽  $\Delta\tau \approx 200$  fs。它的上下包络是假设被测激光脉冲强度的时间轮廓为双曲正割函数平方, 并略去因啁啾引起的光场位相随时间变化的拟合结果。因此为了得到被测激光脉冲的宽度, 必须利用表 1 关系式进行计算, 间接求出被测激光脉冲的宽度。假设被测激光脉冲的时间轮廓与双曲正割函数平方形状相符, 由表 1 可知  $\Delta\tau/\Delta t = 1.55$ , 因此可以算出被测光脉冲宽度为  $\Delta t = 129$  fs。但是, 对于这样的假设是否正确, 还必须利用表 1 中所给出的“时间-带宽积”的理论计算值进行验证。为此, 实验中还需要对被测激光脉冲的光谱特性进行测量。图 4 为利用光谱分辨率为 0.2 nm 的双光栅单色仪测得的被测激光脉冲的频谱特性曲线。由图 4 可知, 它的频谱宽度大约为 3.3 nm, 激光中心波长为 619 nm, 由此算得“时间-带宽积”

表 1 4 种不同强度波形时,  $\Delta t, \Delta\tau$  与  $\Delta\nu$  的关系

Table 1 Relation between  $\Delta t, \Delta\tau$  and  $\Delta\nu$  of four kinds of different intensity waveform

Intensity waveform	$\Delta\tau/\Delta t$	$\Delta t \times \Delta\nu$
Rectangular	1	0.886
Gaussian	1.41	0.441
Sech <sup>2</sup>	1.55	0.315
Lorentzian	2	0.110

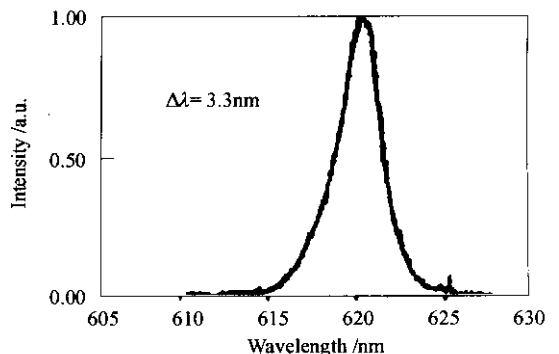


图 4 被测激光脉冲的频谱曲线

Fig. 4 Spectrum profile of detected laser pulse

带宽积”  $p = \Delta t \cdot \Delta \nu \approx 0.325$ , 接近于表 1 中理想的双曲正割函数平方型脉冲的“时间-带宽积”0.315。表 1 中  $\Delta \nu$  为被测激光脉冲的频谱的半高全宽。

### 3 结 论

本文讨论了通过已知光速, 利用迈克尔逊干涉仪产生精确的光程差, 作为皮秒、飞秒脉冲激光测量的时间标定基准, 不仅方便易行, 而且具有足够的测量精度。由于采用统一标定方法, 可以使测量结果相对准确和一致。因此, 它能积极促进超短激光脉冲的深入发展与应用。同时, 对开展超短激光脉冲的计量工作也具有十分重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, **254**(5035):1178~1181
- 2 Liu Tianfu. The present status and prospect of femtosecond spectrum technology [J]. *Physics*, 1992, **21**(2):115~120  
刘天夫. 飞秒光谱技术的现状与展望[J]. 物理, 1992, **21**(2):115~120
- 3 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**(5161):917~924
- 4 Liu Tianfu, Zhang Buxin. Calibration of picosecond streak cameras [J]. *Physics*, 1999, **28**(4):241~243  
刘天夫, 张步新. 皮秒条纹相机的标定[J]. 物理, 1999, **28**(4):241~243
- 5 Liu Tianfu, Hu Guilin. Study of the time standards and calibrating methods of ultrashort laser pulses detection [C]. *SPIE*, 2000, **4231**:608~612

