

# 皮秒自相关仪的性能测试研究

欧阳小平<sup>1</sup> 杨琳<sup>1\*</sup> 彭永华<sup>1</sup> 唐顺兴<sup>1</sup> 刘崇<sup>1</sup> 马金贵<sup>3</sup>  
钱列加<sup>3</sup> 冷雨欣<sup>2</sup> 朱宝强<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800  
<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800  
<sup>3</sup>上海交通大学物理系, 上海 200240

**摘要** 为了实现皮秒拍瓦激光的精密测试, 研制了专用的皮秒自相关仪。选用无色散元件, 提高了测量结果的可靠性。采用自标定方法标定时间分辨率, 用超限法标定时间测量范围, 用极值法标定脉冲响应特性。实验结果表明, 皮秒自相关仪的时间分辨率为 0.1 ps/pixel, 时间测量范围为 26 ps, 脉冲响应特性的值为 300 fs。该皮秒自相关仪能够满足皮秒啁啾脉冲的时间宽度精密测试要求。

**关键词** 超快光学; 精密测试; 自相关; 单次脉冲

中图分类号 TL65<sup>+</sup>3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0408003

## Research on Precise Diagnostics for Pico-Second Single Shot Pulse

Ouyang Xiaoping<sup>1</sup> Yang Lin<sup>1</sup> Peng Yonghua<sup>1</sup> Tang Shunxing<sup>1</sup> Liu Chong<sup>1</sup>  
Ma Jingui<sup>3</sup> Qian Liejia<sup>3</sup> Leng Yuxin<sup>2</sup> Zhu Baoqiang<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>3</sup>Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China

**Abstract** In order to realize precise diagnostics for pico-second pulse of peta-watt laser, an auto-correlator especially for single shot pico-second pulse is developed. Optical elements with no dispersion are used in this pico-second auto-correlator's design, which could improve its precise. Three methods are adopted to testify its characters. Self-calibration is used for time resolution. Over-range is used for time range. Limitation is used for impulse response function. Experimental results show that its time resolution is 0.1 ps/pixel, its time range is 26 ps, and its impulse response function value is 300 fs. So this auto-correlator can fulfill the requirement of precised measurement on pulse width for chirped pulse of pico-second peta-watt laser.

**Key words** ultrafast optics; precise diagnostics; auto-correlation; single shot pulse

**OCIS codes** 120.4640; 320.5390; 320.7100

## 1 引言

常规的皮秒激光脉冲的光谱宽度只有 0.1 ~ 1.0 nm。针对此类的皮秒激光脉冲, 采用经由光栅产生的波前倾斜以增加光程延迟就可以实现脉冲宽度的准确测量<sup>[1]</sup>。因为基于光参变啁啾脉冲放大

(OPCPA)技术的皮秒激光种子源为飞秒脉冲, 所以其啁啾脉冲的光谱宽度为 4 nm 或者更宽。对于宽带的啁啾脉冲, 光栅不仅产生总体的波前倾斜, 对于每个光谱成分而言, 也会产生角色散。光谱越宽, 光栅常数越大, 对皮秒啁啾脉冲的测量结果影响也越

收稿日期: 2011-11-30; 收到修改稿日期: 2012-01-04

基金项目: 国家重大专项基金(1019631-A00)资助课题。

作者简介: 欧阳小平(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率激光参数测量方面的研究。

E-mail: oyxp@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: axiulowt@hotmail.com

大。随着高能皮秒激光技术的发展和工程应用,约 100 J 或者更大能量的高能短脉冲激光迫切需要皮秒单次啁啾脉冲的精密诊断技术<sup>[2,3]</sup>。

在激光脉冲的时间波形精密测试中,一般采用快响应光电管和示波器实现 200 ps 或者更宽的脉冲测量,采用条纹相机实现 30~200 ps 的脉冲波形测量,30 ps 或者更短的脉冲采用单次自相关方法测量。快响应光电管和高速示波器组成的测量系统,其脉冲响应约为 100 ps。常见条纹相机的时间分辨率分别为 2.85 ps/pixel(2 ns 扫描速度),1.43 ps/pixel(1 ns 扫描速度)。考虑到条纹相机的狭缝、成像系统的误差和荧光屏的噪声等因素的影响,采用 1 ns 扫描速度时的脉冲响应为 28 ps。因此目前的条纹相机无法分析脉冲宽度小于 28 ps 的激光脉冲。

为了实现宽带皮秒啁啾脉冲的精密测量,满足拍瓦激光 1~10 ps 的输出脉冲精密测量,本文研制了一台专用的大口径皮秒自相关仪,采用三种测试方法分别用于标定皮秒自相关仪的时间分辨率、时间测量范围以及脉冲响应特性。

## 2 原 理

对于被测脉冲  $I(t)$ ,其自相关信号为

$$I_A(\tau) = \int I(t)I(t-\tau)dt, \quad (1)$$

当被测脉冲为高斯脉冲时,

$$I(t) = I_0 \exp[-4\ln(2t^2)/\tau_{FWHM}^2], \quad (2)$$

式中  $I_0$  为脉冲的光强,在皮秒脉冲的时间宽度测试中,可以认为  $I_0=1$ 。基于(1)式和(2)式,可以得到相应的自相关信号为

$$I_A(t) = \exp[-4\ln(2t^2)/(\sqrt{2}\tau_{FWHM})^2]. \quad (3)$$

在重复频率的超短脉冲测试中,可以基于大量脉冲的统计平均值,动态地改变时间延迟  $\tau$ ,从而得到一条自相关曲线<sup>[4,5]</sup>。为了能够实现单次脉冲的测量,只能采用倾斜相交的两束子光束,基于分波前原理,在空间上的不同位置,产生不同的时间延迟  $\tau$ ,如图 1(a)所示<sup>[6~8]</sup>。为了实现皮秒啁啾脉冲宽度的精密测试功能,基于单次二阶自相关原理研制了一台皮秒量级的自相关仪,如图 1(b)所示,BBO 为非线性晶体。

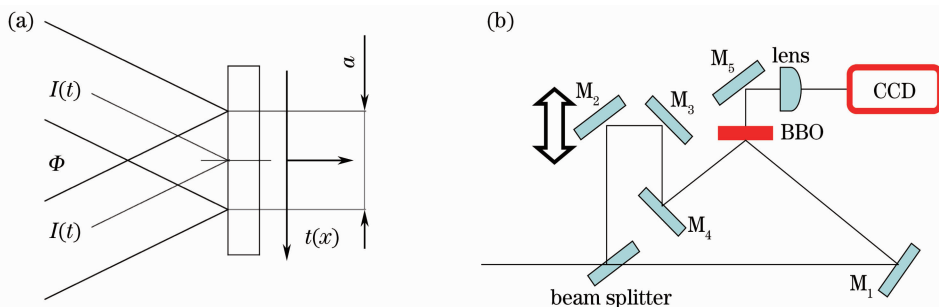


图 1 皮秒自相关仪。(a)单次自相关原理;(b)皮秒自相关仪的原理图

Fig. 1 Single shot auto-correlation for pico-second pulse. (a) Schematic of single shot auto-correlation; (b) theory schematic of single shot auto-correlator for pico-second pulse

## 3 性能测试

### 3.1 时间分辨率

采用自标定法可标定自相关仪的时间分辨率。自相关仪的自标定方法,是通过旋转光程延迟器  $M_2$  和  $M_3$  的螺旋测微头,使自相关过程中的一臂产生时间延迟,从而在探测器的接收面上得到移动的自相关信号。当延迟器的平移量为  $x$  时,CCD 上的自相关信号平移量为  $y$ 。因此可以得到该自相关仪的分辨率为

$$\rho = \frac{2x}{cy}, \quad (4)$$

式中  $c$  为光速。测试结果如图 2 所示,得到了 CCD

上对应的 7 个图像数据。CCD 图像的水平方向为自相关信号的时间轴,通过图像分析软件可以得到 CCD 图像中任意一点的坐标和强度,因此能够分别得到 7 个图像数据中水平方向上的坐标-强度关系曲线,如图 2(b)所示。使用软件可以得到 7 个自相关信号的峰值所对应的坐标位置。

根据图 2 标定的数据,可以得到皮秒自相关仪的时间分辨率为 0.1 ps/pixel。图 2(b)标定数据的线性度误差平方值为 99.94%,因此在该自相关仪测量范围内的线性度非常理想。确定了标定系数之后,就能够根据自相关信号的宽度,计算被测脉冲的宽度。

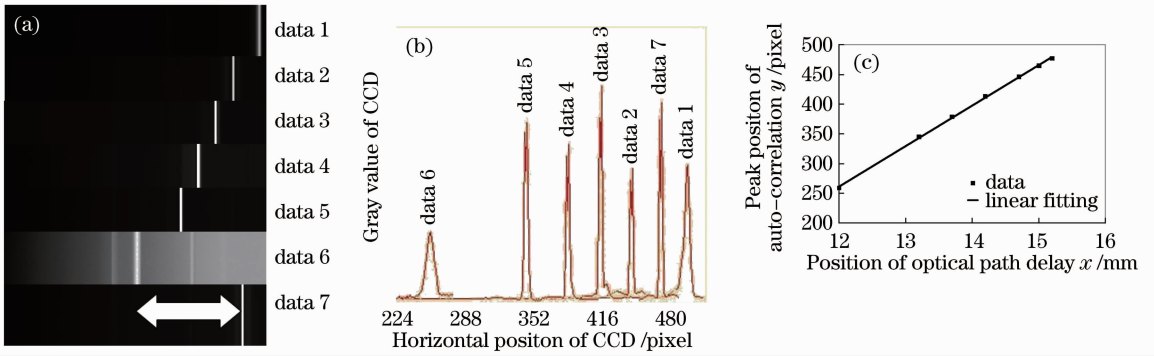


图 2 应用自标定法 CCD 上的二维图像(a)及其水平方向上坐标灰度随坐标的变化(b)和数据拟合(c)

Fig. 2 Self-calibration result. (a) Two-dimensional image of CCD; (b) curve of gray value versus horizontal position and (c) linear fitting

### 3.2 时间测量范围

采用超限法标定皮秒自相关仪的时间测量范围。用该测量仪器去测量一个脉宽已知、并且脉宽大于测量仪器的假定测量范围 10 倍以上的脉冲。在此条件下,测量仪器的测量窗口内将充满了该信号,可以得到该测量仪器的最大可测量范围。根据单次自相关测量的脉宽-束宽关系<sup>[9]</sup>

$$D_{\text{beam}} \geq c\tau / \tan(\Phi/2), \quad (5)$$

可以得到图 1(a)中自相关信号的空间宽度为

$$a = c\tau / \sin(\Phi/2), \quad (6)$$

式中  $\tau$  为被测脉冲宽度,  $\Phi$  为自相关过程的夹角,  $D_{\text{beam}}$  为被测脉冲的直径。由于自相关过程中晶体的直径为 10 mm 和根据(6)式能够得到的最大脉冲宽度为 33.3 ps。但在实际光路中,由于晶体的装夹方式和被测光束的口径限制,晶体的有效尺寸不能够得到充分的利用。因此可以采用纳秒量级的脉冲标定自相关仪的时间测量范围。

在标定实验中,采用 100 mJ, 8 ns 的激光脉冲作为被测对象。8 ns 的激光脉冲,假设其形状为高斯型,其自相关信号的时间宽度为 11.2 ns。当  $\Phi = 60^\circ$  时,结合自相关仪的时间分辨率,8 ns 的激光脉

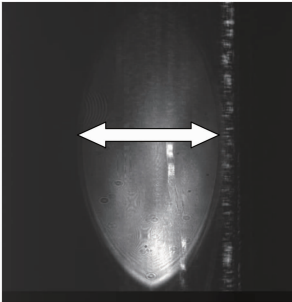


图 3 自相关仪的时间范围标定实验

Fig. 3 Time range calibration of single shot auto-correlator

冲对应的自相关信号的宽度为 4.8 m。该尺寸远远超出了自相关仪的测量范围,因此纳秒级的自相关信号将充满该自相关仪的测量窗口,从而能够反映自相关仪的最大时间测量范围。实验数据如图 3 所示,自相关信号的宽度为 9.55 mm。基于该实验,可以得到自相关仪的时间窗口为 26 ps,高斯型脉冲的最大可测量宽度为 18.4 ps。

### 3.3 脉冲响应特性

采用极值法来标定测量仪器的脉冲响应特性。采用一个无穷小的脉冲宽度作为被测对象,通过该测量仪器得到一个参考值,此数值为该皮秒自相关仪的最小灵敏度,即脉冲响应特性。

由于皮秒自相关仪的时间分辨率为 0.1 ps/pixel,因此 40 fs 的超短脉冲能够作为一个  $\delta$  函数来实现标定实验。当被测脉冲的宽度为 40 fs 时,基于(6)式可以得到 40 fs 超短脉冲自相关信号的空间宽度为 24.0  $\mu\text{m}$ 。由于光束具有衍射效应,所以在精密测量系统中不能让光束自由传输到 CCD 接收面上。为了能够在 CCD 上得到准确的自相关信号,在图 1(b)的光路中使用了一块成像透镜,透镜的焦距  $f = 40$  mm,直径为 15 mm。在标定实验中,通过移动 CCD 来改变像距,从而得到一个最小的自相关信号。CCD 的像素尺寸为 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。实验得到自相关信号的最小空间宽度为 3 pixel(即 60  $\mu\text{m}$ ),如图 4 所示。

在小尺寸的自相关信号成像到 CCD 接收面的过程中,影响像方尺寸的因素有光学系统的成像倍率、波像差和光谱宽度。首先分析成像倍率的影响。实验中的光学系统的物距  $u = 117$  mm,像距  $v = 64$  mm,焦距  $f = 40$  mm,所以成像倍率  $M$  为 0.55。光学系统的放大率小于 1,CCD 接收面上的像应该小于 24  $\mu\text{m}$ 。其次分析波像差的影响。皮秒自相关

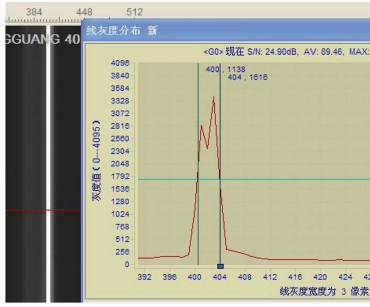


图 4 自相关仪的  $\delta$  函数标定实验

Fig. 4  $\delta$ -Function calibration of single shot auto-correlator

仪中的透镜为商品化元件, 焦距  $f=40$  mm, 口径为 15 mm, 厚度为 5 mm。因为该透镜的  $F$  数为 2.67, 不满足薄透镜的条件, 所以具有很大的波像差, 特别是球差。通过 Zemax 软件数值模拟了该透镜的成像过程。在成像系统中, 物方空间尺寸为  $24 \mu\text{m}$  的自相关信号成像到 CCD 的接收面上。Zemax 软件模拟结果中像方的空间尺寸为  $64.5 \mu\text{m}$ , 等效于 CCD 上的 3 pixel。软件模拟的数值结果与实验结果相吻合。最后分析光谱宽度的影响。当光谱宽度为 20 nm 时, 采用 Zemax 软件进行模拟, 结果为  $65.8 \mu\text{m}$ , 影响很小。所以, 影响小尺寸的自相关信号成像过程的主要因素, 是商品化透镜的成像质量不理想。由于开展该测量仪器性能测试的  $\delta$  函数的值为 40 fs, 因此对应的脉冲响应特性的值为 300 fs。

## 4 结 论

为了满足皮秒拍瓦激光技术的发展要求, 研制了专用的皮秒自相关仪, 并采用相应的测试手段, 标定皮秒自相关仪的时间分辨率、时间测量范围以及脉冲响应特性。确定了皮秒自相关仪的时间分辨率为 0.1 ps/pixel, 时间测量范围为 18.4 ps, 脉冲响应特性的值为 300 fs。通过改进成像系统和 CCD, 皮秒自相关仪能够得到更高的时间分辨率和更小的脉

冲响应。选用更大口径的非线性晶体, 能够得到更宽的时间测量范围。另外使用色散元件, 在时间轴的正交方向上将光谱成分提取出来, 可以实现光谱相位的分析功能。

致谢 感谢谢兴龙研究员和刘华研究员在方案讨论和实验中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Fuling Zhang, Xiaoping Ouyang, Meizhi Sun *et al.*. Diffraction grating single-shot correlation system for measurement of picosecond laser pulses[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1053~1056
- 2 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Tang Shunxing *et al.*. Calibration of pulse signal-to-noise ratio measurement for femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 945~948  
欧阳小平, 张福领, 唐顺兴等. 短脉冲激光信噪比测量的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 945~948
- 3 Xiaoping Ouyang, Xiaoyan Li, Yanli Zhang *et al.*. A method to obtain pulse contrast on a single shot[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1001~1003
- 4 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 742~745  
欧阳小平, 张福领, 张攀政等. 短脉冲激光的二阶自相关[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 742~745
- 5 Xu Qinfeng, Liu Qiong, Ye Qing *et al.*. Auto-correlator for ultra-short pulse laser measurement based on optical fiber devices [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1607~1612  
徐钦峰, 刘琼, 叶青等. 基于光纤器件的超短脉冲自相关仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1607~1612
- 6 F. Salin, P. Georges, G. Roger *et al.*. Single-shot measurement of a 52-fs pulse[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21): 4528~4531
- 7 Sun Zhihong, Xia Yanwen, Liu Hua. Picosecond pulse duration measurement using non-collinear single-shot autocorrelator[J]. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(8): 876~879  
孙志红, 夏彦文, 刘华. 单发次皮秒脉冲宽度的二阶自相关法测试[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(8): 876~879
- 8 Wang Xingtao, Yin Dingjun, Shuai Bin *et al.*. Measure ultrashort pulsewidth with total reflection second-order autocorrelator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1018~1020  
王兴涛, 印定军, 帅斌等. 应用全反射二阶自相关仪测量超短脉冲脉宽[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- 9 M. Raghuramaiah, A. K. Sharma, P. A. Naik *et al.*. A second-order autocorrelator for single-shot measurement of femtosecond laser durations[J]. *Sadhana*, 2001, **26**(6): 603~611

栏目编辑:何卓铭