

# 高功率超短激光脉冲特性的三阶相关测量

王宇煜 欧阳小平\* 杨琳 唐清 潘雪 郭亚晶 惠宏超 朱宝强

(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)

**摘要** 为了准确测量皮秒量级超短脉冲的信噪比, 扩大测量仪器的可测动态范围, 针对高功率超短激光脉冲在相关过程中产生参量荧光的问题, 研制了一台重复频率扫描测量的三阶相关仪, 并在皮秒域短脉冲光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)抽运源上开展了测量技术研究。研究实验表明, 通过采用大角度非共线匹配方式, 消除了参量荧光对测量过程的影响, 进而通过结构优化降低了背景噪声的影响, 使可测动态范围达到  $10^7$  左右。由于互相关技术的非对称性, 该测量系统可同时提供时间波形的分析功能。测量结果显示, 激光脉冲前沿与双曲正割(sech)型曲线比较吻合, 而脉冲后沿与高斯型曲线吻合得比较好。

**关键词** 非线性光学; 三阶相关; 信噪比; 时间波形

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1208002

## Measurement of Ultrashort High-Power Laser Pulse with Third Order Correlation Technique

Wang Yuyu Ouyang Xiaoping Yang Lin Tang Qing Pan Xue  
Guo Yajing Hui Hongchao Zhu Baoqiang

(Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to obtain accurate signal to noise ratio (SNR) measurement of picosecond ultrashort pulse and enlarge the range of pulse SNR measurement, a repetition frequency scanning third-order correlator is built, which considers the problem of parametric fluorescence induced by ultrashort high-power laser pulses in correlated process. Besides, the measurement technology is carried on picosecond short-pulse optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) pump source. The results show that the impact of parametric fluorescence on the measurement is largely eliminated by large-angle noncollinear phase matching, furthermore, by reducing the background noise the dynamic range can achieve about  $10^7$ . Because of the asymmetry of cross-correlation technique, the correlator can also analyze temporal profile. The results indicate that pulse front edge is coincident with sech type curve, and pulse back edge has good agreement with Gauss type curve.

**Key words** nonlinear optics; third-order correlation; signal-to-noise ratio; temporal profile

**OCIS codes** 120.4640; 320.7100; 190.2620

## 1 引言

为了降低惯性约束聚变的输出能量要求, 且在激光驱动器输出较低能量下满足物理实验的要求,

需要利用短脉冲的拍瓦激光进行快点火实验研究。拍瓦激光装置中, 从振荡器输出的飞秒啁啾脉冲被展宽为纳秒脉冲, 然后依次通过光学参量啁啾脉冲

**收稿日期**: 2012-07-09; **收到修改稿日期**: 2012-08-18

**基金项目**: 国家重大专项基金(1019631-A00)资助课题。

**作者简介**: 王宇煜(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光参数测试、准直控制等方面的研究。

E-mail: wangyuyu@siom.ac.cn

**导师简介**: 朱宝强(1966—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事高功率激光系统中非线性光学和光束质量测控等方面的研究。

E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: oyxp@siom.ac.cn

放大器(OPCPA)、主放大器进行放大,之后再经光栅压缩获得  $10^{15}$  W 的皮秒脉冲,从而在焦点处得到  $10^{19} \sim 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 以上的功率密度<sup>[1~4]</sup>。信噪比(SNR)是超短脉冲激光的一项重要指标<sup>[5]</sup>,过高的噪声会在靶丸上产生等离子体,屏蔽后续的主脉冲,使之无法与靶丸相互作用。快点火实验对拍瓦激光装置的信噪比提出了  $10^8$  以上的苛刻要求。为了满足该要求,保证拍瓦激光装置运行的稳定性和可靠性,需要研究高动态范围信噪比的测量系统。

由于皮秒和飞秒脉冲的持续时间短于光电探测器的响应时间,因此只能采用自相关方法进行超短脉冲的时间特性和信噪比的测量。目前二阶相关法<sup>[6,7]</sup>和三阶相关法<sup>[8]</sup>是普遍采用的方法。王益民等<sup>[9]</sup>从理论上分析了二阶相关法和三阶相关法的不同,数值模拟显示三阶相关法可以测量出噪声的准确位置,而且比二阶相关法具有更高的测量精度,而二阶相关法则由于对称性而无法做到这一点。王兆华等<sup>[8]</sup>研制了一台三阶相关仪,将基频光和倍频光通过透镜聚焦到和频晶体上,实现非共线匹配,获得了  $10^5$  的可测动态范围。张福领等<sup>[10]</sup>研制了一台共线三阶相关仪,对脉冲功率为  $10^4$  W 的飞秒激光振荡器进行了测量,通过在测量光路中加入透镜进行聚焦准直,从而提高非线性转换效率,使测量系统的可测动态范围达到  $10^8$  左右,但透镜本身会引入剩余反射造成的干扰噪声。

已有的测量方法又分为单次测量和重复频率的扫描测量。单次测量是将光束在空间上实现分离,从而获得相关过程中的多个时间延迟,对单个被测脉冲实现扫描;重复频率的扫描测量,要用光程延迟器来改变被测脉冲和扫描脉冲之间的时间延迟。单次测量的缺点是动态范围和时间窗口受限。

本文通过研究三阶相关过程,针对高功率超短激光脉冲在相关过程中产生参量荧光的问题,采用非共线匹配方式,建立了一套重复频率扫描的三阶相关测量系统,并在皮秒域短脉冲 OPCPA 抽运源上对脉冲的信噪比进行了测量研究,之后对该装置进行结构改进,通过增加整个装置的机械密封性,并将探测器置于套管中,在探测器前面加上快门,用激光脉冲的输出信号来同步触发快门,尽可能地消除了日光灯发出的紫外线以及其他环境噪声对测量的影响,从而降低了背景噪声,获得了  $10^7$  左右的动态范围,同时完成了对时间波形的测量,为实现三阶相关的高动态范围测量做好了前期准备工作。

## 2 原 理

三阶相关原理与二阶相关类似,采用非线性晶体实现,它是利用两个不同的信号进行相关作用,通过改变两个信号之间的相对延时,就可以得到随时间变化的三阶相关信号。

光强  $I(t)$  的三阶相关函数可表示为<sup>[11,12]</sup>

$$I_c(\tau) = \int I(t)I^2(t-\tau)dt, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为信号  $I^2(t)$  与  $I(t)$  之间的时间延迟。

### 2.1 半峰全宽

在相关测量曲线中,横坐标是光程延迟量,纵坐标是相关信号的强度,因此相关曲线的半峰全宽(FWHM)并不是被测脉冲的半峰全宽,但它们之间存在一定的联系。

假定激光主脉冲的时间形状为高斯型,则待测脉冲的时间函数可表示为

$$I(t) = I_m \exp[-4\ln 2(t^2/\tau_m^2)], \quad (2)$$

式中  $I_m$  表示主脉冲的峰值功率, $\tau_m$  表示主脉冲的半峰全宽。将(2)式带入(1)式得

$$I_c(\tau) = \frac{\tau_m}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3\ln 2}} I_m^3 \exp\left(-\frac{8\ln 2}{3\tau_m^2} \tau^2\right), \quad (3)$$

所以三阶相关信号的半峰全宽为

$$\tau_x = \sqrt{3/2} \tau_m = 1.224745 \tau_m. \quad (4)$$

在测得三阶相关曲线的半峰全宽后,可以由(4)式计算得被测脉冲的半峰全宽。

### 2.2 信噪比

假定激光主脉冲的时间形状和噪声脉冲的时间形状都为高斯型,则该待测脉冲的时间函数可表示为

$$I(t) = I_m \exp[-4\ln 2(t^2/\tau_m^2)] + I_n \exp[-4\ln 2(t+T)^2/\tau_n^2], \quad (5)$$

式中  $I_n$  表示噪声脉冲的峰值功率, $\tau_n$  表示噪声脉冲的半峰全宽, $T$  为主脉冲和噪声脉冲之间的时间间隔,(5)式表示有一个峰值功率为  $I_n$  的噪声脉冲位于激光主脉冲的前面时间  $T$  处,则待测脉冲的信噪比为

$$R_{SN}^{\text{origin}} = I_m/I_n. \quad (6)$$

将(5)式代入(1)式,经过化简<sup>[9]</sup>,可得到  $I(t)$  的三阶相关函数为

$$I_c(\tau) = \frac{\tau_m}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3\ln 2}} I_m^3 \exp\left(-\frac{8\ln 2}{3\tau_m^2} \tau^2\right) + \frac{\tau_m \tau_n}{2} \times \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2(\tau_m^2 + 2\tau_n^2)}} I_m^2 I_n \exp\left[-\frac{8\ln 2}{\tau_m^2 + 2\tau_n^2} (\tau + T)^2\right], \quad (7)$$

(7)式表示在  $\tau=0$  和  $\tau=-T$  处分别有一激光脉冲,这与原激光脉冲的时间特征是一致的,反映出了噪声脉冲的准确位置;可以得出三阶相关测量曲线的信噪比为

$$R_{SN}^{3rd} = \frac{\frac{\tau_m}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3 \ln 2}} I_m^3}{\frac{\tau_m \tau_n}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2 (\tau_m^2 + 2\tau_n^2)}} I_m^2 I_n} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_m}{\tau_n}\right)^2} R_{SN}^{origin}, \tau_m = \tau_n$$

$$= \begin{cases} R_{SN}^{origin}, & \tau_m = \tau_n \\ 0.8 R_{SN}^{origin}, & \tau_m \neq \tau_n \end{cases}. \quad (8)$$

在一般情况下可以认为,三阶相关曲线的信噪比等于原始脉冲曲线的信噪比。所以,通过三阶相关函数,可以比较准确地反映出原函数所代表的激光脉冲信噪比的大小以及前置噪声脉冲的准确位置。

### 3 实验与结果

实验中所用入射光的中心波长为 1053 nm,重复频率为 1 Hz,单脉冲能量为 1.4 mJ,半峰全宽约为 10 ps,脉冲功率约为  $10^8$  W。

先将入射基频光通过偏振分光棱镜(PBS)分成两束:一束光入射到一块倍频 BBO 晶体上以产生 527 nm 的二次谐波,采用共线 I 类相位匹配;另外一束光通过一个光程延迟器,使基频光和倍频光之间产生时间延迟  $\tau$ 。再将两束光以一定夹角入射到一块和频 BBO 晶体上,采用非共线 I 类相位匹配。实验中先调节两束光的光程相等,再调节晶体的相位匹配方向,即可观察到 351 nm 的三次谐波输出。最后采用光电倍增管(PMT)进行数据采集,就可以得到随时间变化的三阶相关曲线。实验装置图如图 1 所示。

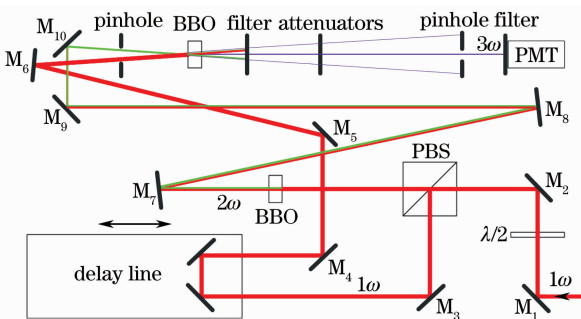


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of measurement system

实验中,1053 nm 的入射光为线偏振光,将半波片与 PBS 配合使用,通过旋转半波片,可以获得可变分光比的 PBS,实验中分光比为 1:1。经过 PBS

后的透射光为 p 偏振光,反射光为 s 偏振光。透射光经倍频晶体倍频后,产生 527 nm 绿光,由于是 I 类相位匹配,绿光为 s 偏振光,最后两束 s 偏振光在和频 BBO 晶体上进行非共线 I 类相位匹配。

之所以在倍频之前分光,是因为基频光经过倍频晶体之后部分转换为倍频光,所剩基频光的脉冲特性发生了变化,不利于三阶相关测量。

图 1 中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_5$ 、 $M_6$  为 1053 nm 高反镜,  $M_7$  和  $M_8$  为 527 nm 高反镜,  $M_9$  和  $M_{10}$  为 527 nm 高反、1053 nm 高透的二向色镜滤光片。经过  $M_9$  和  $M_{10}$  就可以将倍频光路中的基频光过滤掉。

第一个小孔的作用是方便调节光路,确定非共线相位匹配的夹角,实验中两束光的夹角为  $11^\circ$ ,同时滤除杂散光;第一个紫外滤光片用来滤掉基频光、倍频光和基频光产生的自倍频光;第二个小孔的作用是用来拦去绝大部分的参量荧光,确保只让沿三倍频方向出射的光通过;第二个紫外滤光片用于滤除杂散光。

测量时,改变延迟会使三次谐波的强度发生变化,用 PMT 接收比较强的信号时,会导致其饱和,因此采用一组不同透射率的衰减片来对入射到 PMT 上的信号进行衰减,真实的三阶相关信号强度为实际测量到的信号强度与衰减倍率的乘积。

图 2 为利用该三阶相关测量装置测得的三阶相关曲线。图中 a 为共线匹配方式下由参量荧光带来的噪声,已经可以和互相关信号的强度相比拟了,所以针对高功率超短激光脉冲在互相关过程中产生参量荧光的问题,必须采用非共线匹配方式;b 为非共线匹配方式下测得的背景噪声,动态范围提高了 2 个量级,达到  $10^5$  左右。对于图 2 中的三阶相关曲线,出现在主脉冲前 329 ps 和 352 ps 位置处的两个尖峰,是由于前端种子脉冲不稳定引起的,不反映测量系统的工作性能。在主脉冲前 364 ps 以前,归一化的信号强度已经接近背景噪声,说明通过采用大角度的非共线相位匹配,已经很好地抑制了参量荧光的影响;c 为对实验装置进行结构优化后,采用非共线匹配方式测得的背景噪声,通过增加整个装置的机械密封性,并将探测器置于套管中,在探测器前面加上快门,用激光脉冲的输出信号来同步触发快门,降低了背景噪声,动态范围继续提高了 2 个量级,达到  $10^7$  左右。

相对于共线匹配方式,采用非共线匹配方式后,动态范围提高了 2 个量级;之后在非共线匹配方式

下,再对整个装置进行结构优化降低背景噪声,动态范围继续提高了2个量级。对于高功率超短激光脉冲特性的三阶相关测量,这两种方式的组合应该是目前最有效的措施。

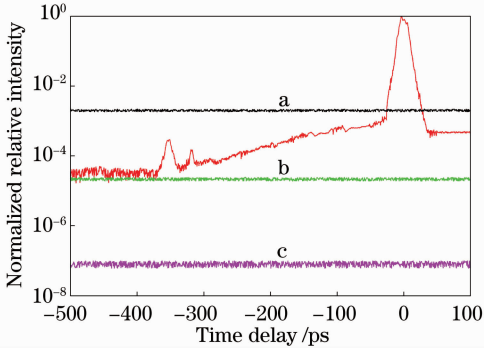


图 2 三阶相关曲线

Fig. 2 Third-order correlation curves

在非共线情况下,可以认为和频晶体中发生作用的是电场分量在输出光强方向上的投影。在角度增大的情况下,三倍频光强将会有所减弱。这是因为两束输入信号光在倍频方向上的分量减小,但其数值变化服从余弦函数的慢变特性,不会出现数量级上的改变。而本文采用非共线匹配方式隔绝参量荧光、结构优化降低背景噪声来扩大测量系统的动态范围,目前的可测动态范围在  $10^7$  左右。在非共线匹配方式下,三倍频的相位匹配角难以调节,所以下一步准备用电机来微调晶体,从而提高互相关过程的转化效率,将测量系统的动态范围提升到  $10^{10}$  以上。

图 3 为从三阶相关曲线中取出主脉冲部分得到的时间波形曲线,对原始数据进行立方插值,所得曲线的半峰全宽为 13.5 ps,以此作为三阶相关信号的半峰全宽,根据(4)式,可得对应的被测脉冲半峰全宽为 11.0 ps。对于采用三阶互相关方法得到的时间波形,可以辨别出脉冲前后沿的具体形状,从图中

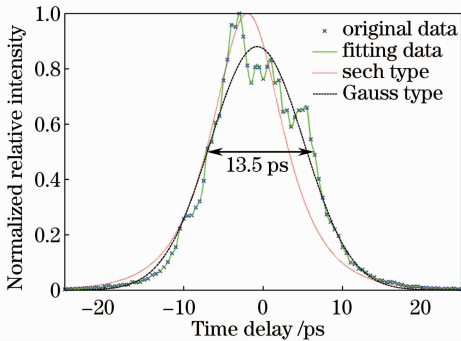


图 3 时间波形曲线

Fig. 3 Temporal waveform curves

可以看出,脉冲前沿与双曲正割(sech)型曲线比较吻合,而脉冲后沿与高斯型曲线吻合得比较好,激光主脉冲的前沿比后沿陡,这与一般的脉冲放大结果是一致的,所以很好地体现出了三阶互相关测量的前后沿分辨能力和优势。

## 4 结 论

由于高功率超短激光脉冲在相关过程中会产生参量荧光,为了消除参量荧光对测量过程的影响,建立了一台非共线三阶相关仪,并在皮秒域短脉冲 OPCPA 抽运源上开展了信噪比和时间波形的测量研究。通过采用非共线匹配方式,配合小孔的使用,尽可能地消除了参量荧光对测量的影响,动态范围提高了2个量级,但由于两束光夹角较大,一定程度上降低了三倍频效率。通过改进结构设计降低背景噪声,动态范围能够继续提高2个量级。该测量系统目前可实现的动态范围达到  $10^7$  左右。下一步将通过提高互相关过程的转化效率,将测量系统的动态范围提升到  $10^{10}$  以上。对于采用三阶互相关方法得到的时间波形,可以辨别出脉冲前后沿的具体形状,很好地体现了三阶互相关测量的前后沿分辨能力。

## 参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 2 A. Antonetti, F. Blasco, J. P. Chambaret *et al.*. A laser system producing  $5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> at 10 Hz[J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2): 197~204
- 3 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Temporal property of tiled grating compressor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 701~705  
马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅压缩器的时域特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 701~705
- 4 Xia Lan, Yang Xuedong, Xu Guang *et al.*. Tiled-grating rotation detecting technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308001  
夏 兰, 杨学东, 徐 光 等. 光栅拼接旋转误差检测系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0308001
- 5 Wang Ke, Qian Liejia. Signal-to-noise ratio of ultrashort high-power pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1): 1~5  
王 科, 钱列加. 高功率超短激光脉冲信噪比的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(1): 1~5
- 6 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[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
- 7 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua *et al.*. Research on precise diagnostics for pico-second single shot pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0408003  
欧阳小平, 杨 琳, 彭永华 等. 皮秒自相关仪的性能测试研究

- [J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0408003
- 8 Wang Zhaohua, Wang Peng, Wei Zhiyi *et al.*. Measurement of femtosecond laser pulses with third order correlation technique [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(2): 173~176  
王兆华, 王 鹏, 魏志义 等. 超短脉冲激光特性的三阶相关测量研究[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(2): 173~176
- 9 Wang Yimin, Han Shensheng, Zhang Zhengquan *et al.*. Contrast ratio measurement of laser pulses using correlation technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4): 493~496  
王益民, 韩申生, 张正泉 等. 利用相关技术测量激光脉冲的对比度[J]. 光学学报, 1997, **17**(4): 493~496
- 10 Zhang Fuling, Ouyang Xiaoping, Xie Xinglong *et al.*. Contrast measurement of ultrashort laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1171~1174  
张福领, 欧阳小平, 谢兴龙 等. 超短激光脉冲对比度的三阶相关测量[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1171~1174
- 11 S. Luan, M. H. R. Hutchinson, R. A. Smith *et al.*. High dynamic range third-order correlation measurement of picosecond laser pulse shapes [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**(12): 1426~1429
- 12 J. Collier, C. Hernandez-Gomez, R. Allott *et al.*. A single-shot third-order autocorrelator for pulse contrast and pulse shape measurements[J]. *Laser and Particle Beams*, 2001, **19**(2): 231~235

栏目编辑: 宋梅梅