

# 利用扫描式三阶相关技术测量超短脉冲激光的特性研究

包文霞 张楠 孔梦清 朱晓农

南开大学现代光学研究所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

**摘要** 本文采用共线和非共线两种大动态范围扫描三阶相关技术测量飞秒激光脉冲,并对其测量结果及其特征进行了理论和实验分析。实验发现,共线式扫描三阶相关方法由于存在基频光在空气中通过三倍频过程直接产生三次谐波的现象,导致实际能够测量的动态范围下降;而非共线式扫描三阶相关技术虽然对脉冲强度具有较高的动态测量范围,但非共线夹角和光斑的大小对测量脉冲宽度有很大的影响。理论计算和实验结果表明,非共线情况下,入射到和频晶体上的光束夹角和光斑直径越大,测量得到的脉冲宽度也越大。共线和非共线两种方式均不影响对次脉冲位置的判断,但由于非共线式三阶相关测量得到的脉冲宽度增加,主脉冲附近的小脉冲结构或者距离较近的两个脉冲将会难以分辨。

**关键词** 超快光学; 扫描式三阶相关仪; 非共线和频; 脉冲宽度; 脉冲对比度

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708009

## Measurement of Ultrashort Pulse Laser with Scanning Third Order Correlation Technique

Bao Wenxia Zhang Nan Kong Mengqing Zhu Xiaonong

Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

**Abstract** Measurement results of femtosecond laser pulses with the home-made collinear and non-collinear, large dynamic range, scanning third-order correlation technique are analyzed theoretically and experimentally. It is found that the dynamic range is low for the collinear scanning third-order correlation method because of the direct third harmonic generation of the fundamental light in air. While the non-collinear measurement does not have this problem and thus has a higher dynamic range, the non-collinear angle and spot size have a significant influence on the measured pulse duration. In particular, both theoretical simulation and experimental results show that the measured pulse duration increases with the beam angle and spot size in this latter case. Although both non-collinear and collinear approaches can help locate the weak satellite pulses, due to the artificial pulse broadening introduced in the non-collinear scheme, it will be difficult for using this method to resolve or distinguish the detailed structures around the main pulse or any closely located neighboring pulses.

**Key words** ultrafast optics; scanning third-order correlator; non-collinear sum frequency; pulse duration; pulse contrast

**OCIS codes** 320.7100; 190.7110; 120.1880

收稿日期: 2015-01-12; 收到修改稿日期: 2015-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(11274185, 61137001)

作者简介: 包文霞(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事超短激光脉冲测量技术方面的研究。

E-mail: baowenxia2003@aliyun.com

导师简介: 朱晓农(1957—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光技术与应用等方面的研究。

E-mail: xnzhu1@nankai.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

随着超短脉冲激光技术的发展,飞秒激光的应用日趋广泛。与此相应,人们对飞秒激光脉冲时域特性的精确表征也愈加关注,尤其在强激光与物质相互作用方面,需要尽可能准确地测量激光脉冲宽度和脉冲对比度。目前对超短脉冲激光进行测量的方法有多种,包括二阶、三阶相关法<sup>[1-8]</sup>(FROG)<sup>[9-10]</sup>以及(SPIDER)<sup>[11]</sup>等。二阶相关法由于其测量结果的自身时间反演对称性,无法分辨脉冲的前后沿及其可能存在的非对称形态。FROG和SPIDER等方法虽然能够还原出脉冲的振幅和相位,但需要用到复杂的算法且通常无法给出较高的脉冲对比度信息。而三阶相关法不但可以区分脉冲的前后沿,而且可以获得极高的动态范围。目前,文献中所报道的三阶相关仪测量动态范围最高可达到 $10^{11}$ 以上<sup>[12]</sup>。

与二阶相关测量法一样,三阶相关方法也可以分为单次和多次扫描两种方式。对于激光脉冲强度达到太瓦、拍瓦量级,重复频率较低的超短脉冲激光,需要采用单次测量。而对于能量输出稳定、重复频率较高的激光脉冲通常采用扫描测量方式。单次三阶相关技术,由于受到探测仪器自身测量范围的限制等因素,其测量的动态范围通常较低。如文献[13]中采用分区测试和图形重构技术,得到的脉冲对比度仅为 $10^5$ 左右。文献[14]采用类似标准具结构的脉冲复制器,对不同时间延迟的多束倍频光分别进行衰减,并行的与基频光同时进入和频晶体产生三阶自相关信号,获得离散的脉冲信息,对比度约为 $10^6$ 。而采用扫描式三阶相关法测量可以获得大动态范围和较宽的时间测量窗口,如文献[4]中作者采用扫描三阶自相关方法测量超短脉冲激光的动态范围在 $10^6$ 左右。文献[5]和[6]中报道的测量动态范围都可达到 $10^8$ ,文献[12]中基于光参量放大技术设计的三阶相关仪的测量动态范围达到了 $10^{11}$ 。

本文从理论和实验两方面研究利用自制的扫描式三阶相关仪以共线和非共线两种方式测量一台脉冲重复频率1 kHz,脉宽50 fs的商业化飞秒激光放大器输出激光脉冲的结果,给出了两种情况下的脉宽及对比度测量曲线。研究表明,在共线情况下,由于基频光在空气中直接三倍频产生三次谐波,导致测量动态范围较低,因此测量不到脉冲的本底信号和强度较小的预脉冲信号。而在非共线情况下,虽然相关仪具有更高的动态测量范围(可达 $10^7$ 以上),但由于存在横向空间延时的弥散效应,两光束的夹角以及光斑大小对实际测量得到的脉冲宽度会有很大的影响,因此,这种情况下只有通过尽量减小入射光斑尺寸及光束夹角才能得到准确的脉宽测量值。

## 2 扫描式三阶相关仪测量原理

通常的扫描式三阶相关测量实际上是一种三次谐波产生和时间相关测量的组合。具体的方法通常是先将待测的入射激光经过一个非线性晶体进行倍频以产生二次谐波光,然后将二次谐波光与基频光分开,并在两者之间引入一个可变的时间延时,最后再将两者共同聚焦入射至另一块非线性晶体中进行和频,从而产生三次谐波。改变基频光与倍频光之间的相对延时,就可以测量记录到随延迟时间变化的三阶相关信号。在第二块非线性晶体中产生待测入射激光的三次谐波时,两束光即基频光与倍频光可以分为共线和非共线两种形式进行和频。下面对两种形式测量超短激光脉冲时得到的三阶相关信号进行理论分析并给出计算结果。

假设带有一个次脉冲的飞秒激光脉冲的时域电场为高斯型分布,则其光强可以表示为

$$I(t) = I_0 \exp(-2at^2) + I_1 \exp[-2a_1(t+T)^2], \quad (1)$$

式中 $I_0$ 和 $I_1$ 分别表示主脉冲和次脉冲的峰值强度, $a = 2\ln 2/\Delta t^2$ , $a_1 = 2\ln 2/\Delta t_1^2$ , $\Delta t$ 和 $\Delta t_1$ 分别为主脉冲及次脉冲的半峰全宽(FWHM), $T$ 为两个脉冲之间的时间间隔。(1)式表示在激光主脉冲之前时间 $T$ 处,有一个峰值光强为 $I_1$ 的次脉冲。

共线情况下的三阶相关函数为<sup>[15-16]</sup>

$$G_3(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I^2(t)I(t-\tau)dt, \quad (2)$$

式中 $\tau$ 为基频光与倍频光之间的时间延迟。将(1)式带入上式中,经过积分运算和化简可得

$$G_3(\tau) = \sqrt{\frac{\pi}{6a}} I_0^3 \exp\left(-\frac{4}{3}a\tau^2\right) + \sqrt{\frac{\pi}{4a+2a_1}} I_0^2 I_1 \exp\left[-\frac{4aa_1}{2a+a_1}(\tau+T)^2\right] + \sqrt{\frac{\pi}{4a_1+2a}} I_0 I_1^2 \exp\left[-\frac{4aa_1}{2a_1+a}(\tau-T)^2\right]. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,在三阶相关曲线上  $\tau=0$ 、 $\tau=-T$  和  $\tau=T$  处分别有一个激光脉冲,在  $\tau=-T$  和  $\tau=T$  处的次脉冲与主脉冲的峰值比分别为  $\sqrt{\frac{6a}{4a+2a_1}} \frac{I_1}{I_0}$  和  $\sqrt{\frac{6a}{4a_1+2a}} \left(\frac{I_1}{I_0}\right)^2$ 。由于  $I_1 \ll I_0$ , 所以  $\tau=T$  处的脉冲强度相比于前两项要弱很多,而在  $\tau=-T$  处脉冲峰值比与实际的待测激光脉冲相近,因此从三阶相关曲线上可判别出实际的次脉冲位置。从(3)式中还可以计算出三阶相关曲线中主脉冲宽度  $\Delta\tau$  与实际脉冲宽度的关系为  $\Delta t = \Delta\tau/C \approx \Delta\tau/1.225$ ,  $C$  为共线式三阶相关曲线与实际脉冲宽度的比例系数,其值与脉冲形状相关。在  $\tau=-T$  处次脉冲宽度为  $\Delta\tau_1 = \sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t^2/2}$ 。

在非共线情况下,两束光以一定的夹角  $\theta$  入射到倍频晶体中,产生了横向空间延时效应,即在同一时刻不同横向位置处的脉冲延迟时间不同。实际上,这正是单次自相关所需要的效应。但在多次扫描相关中则会造成三阶相关曲线的展宽<sup>[17]</sup>。如图1所示,设光斑中心处两脉冲的时间延迟为  $\tau$ ,则光束两端的时间延迟分别为  $\tau - \frac{d}{c} \tan \frac{\theta}{2}$  和  $\tau + \frac{d}{c} \tan \frac{\theta}{2}$ 。其中  $c$  为光速,  $d$  为光斑直径。由横向空间延时效应所引起的脉宽展宽量可表示为<sup>[17]</sup>

$$\Delta\tau_{\text{trans}} = \frac{2d}{c} \tan \frac{\theta}{2} \approx d\theta/c. \quad (4)$$

则探测器所接收到的三次谐波相关信号是由晶体中这个空间区域内许多不同延迟时间的脉冲相关产生的信号强度的总和。因此可表示为

$$G_{3c}(\tau) = \int_{\tau - \frac{d}{c} \tan \frac{\theta}{2}}^{\tau + \frac{d}{c} \tan \frac{\theta}{2} + \infty} \int_{-\infty}^{\infty} I^2(t) I(t - \tau) dt d\tau. \quad (5)$$

将(1)式代入上式中,经过数值积分计算,可得到非共线情况下的三阶相关函数。

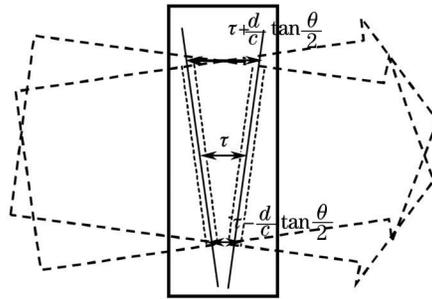


图1 三阶相关非共线和频示意图

Fig.1 Schematic of non-collinear sum frequency in third-order correlation

### 3 三阶相关数值计算结果

图2中给出了共线和非共线两种情况下得到的三阶相关曲线,图2(a)为(1)式所表示的待测激光脉冲,图2(b)为共线情况下的三阶相关曲线,图2(c)为非共线情况下的三阶相关曲线。公式中取  $I_0 = 1$  和  $I_1 = 0.1$ , 主脉

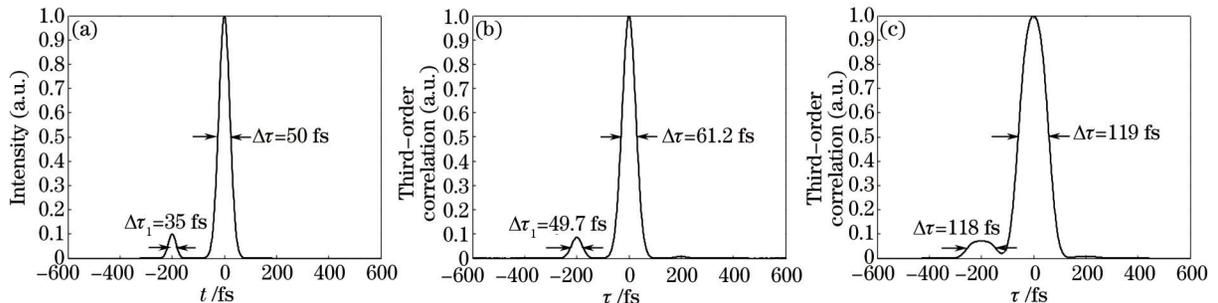


图2 (a) 理论模拟得到的待测激光脉冲; (b) 共线三阶相关曲线; (c) 非共线和频三阶相关曲线

Fig.2 (a) Original laser pulse; (b) its corresponding third order correlation curves with collinear; (c) non-collinear third order correlation curves

冲及次脉冲宽度分别为  $\Delta t = 50$  fs 和  $\Delta t_1 = 35$  fs, 两个脉冲之间的时间间隔取  $T=200$  fs。光斑直径  $d=2$  mm, 两束光入射夹角  $\theta = 1^\circ$ 。从图中可以看出, 共线情况下得到的曲线宽度为 61.2 fs, 与实际脉宽值满足关系式  $\Delta\tau/\Delta t = 1.225$ 。而对于非共线和频的情况, 此参数下得到的三阶相关曲线宽度为 119 fs, 约为共线时的 2 倍。显然以非共线和频方式测量得到的脉宽值要比真实值展宽了很多。

由(5)式可知, 非共线三阶相关曲线的展宽不仅是实际待测的脉冲宽度的函数, 而且还与入射光的光斑直径和光束夹角有关。将非共线三阶相关曲线宽度表示为  $\Delta\tau_n$ , 则其与实际脉冲宽度的比值(展宽系数)为  $C_n = \Delta\tau_n/\Delta t$ 。图 3 给出了  $C_n$  随光斑直径[图 3(a)]、入射光夹角[图 3(b)]以及待测激光脉冲宽度[图 3(c)]的变化曲线。图 3(a)中取  $\theta = 1^\circ$ ,  $\Delta t = 50$  fs; 图 3(b)中取  $d=2$  mm,  $\Delta t = 50$  fs; 图 3(c)中取  $\theta = 1^\circ$  和  $d=2$  mm。从图 3(a)和 (b)中可明显看出, 展宽系数随入射光斑直径和两入射光夹角的增大而增大, 光斑直径越大, 入射光夹角越大, 则得到的三阶相关曲线宽度也就越大; 图 3(c)表明展宽系数  $C_n$  随激光脉冲宽度的减小而增大, 即对于越短的脉冲, 非共线测量曲线展宽效应越明显。尤其对于脉宽小于 50 fs 的脉冲, 展宽系数变化非常迅速。由于展宽系数是脉宽的函数, 因此不能从三阶相关曲线宽度简单地换算出实际脉冲的宽度。要计算出准确的脉宽值则需要由(5)式数值反解出待测激光脉冲的宽度。

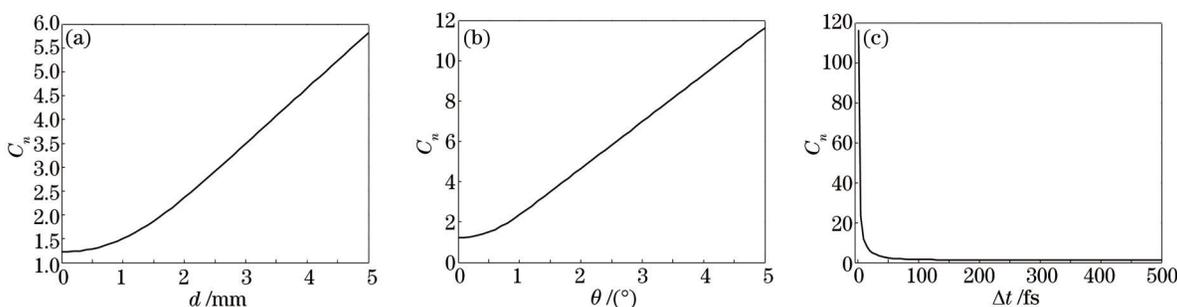


图 3 非共线三阶相关曲线展宽系数  $C_n$  变化曲线。(a) 随光斑直径变化; (b) 随入射光夹角变化; (c) 随待测激光脉冲宽度的变化

Fig.3 Broadening coefficient of non-collinear third order correlation curve as a function of beam parameter.

(a) Change with spot diameter; (b) change with incident angle; (c) change with laser pulse width

另外, 从图 2 中还可以看出, 在共线和非共线两种情况下获得的次脉冲的位置一致, 与理论假设值相符, 因此两种方法都不影响对次脉冲位置的判断。但由于横向空间延时效应, 非共线相关测量曲线上主脉冲两边的小脉冲的宽度也展宽了很多, 因而与主脉冲连接在了一起。由此可见, 对于非共线测量, 如果没有控制好横向空间延时展宽效应, 主脉冲前后沿邻近区域内的脉冲结构可能会与距离较近的次脉冲重合在一起, 从而无法清楚地分辨。

### 4 三阶相关实验测量

实验装置如图 4 所示。由掺钛蓝宝石飞秒激光放大器产生的中心波长为 800 nm 的飞秒激光脉冲先经过 3:7 的分束镜(BS)分成两束。较强的一束通过一个 250  $\mu\text{m}$  厚的二倍频晶体(BBO1)产生 400 nm 倍频光(相

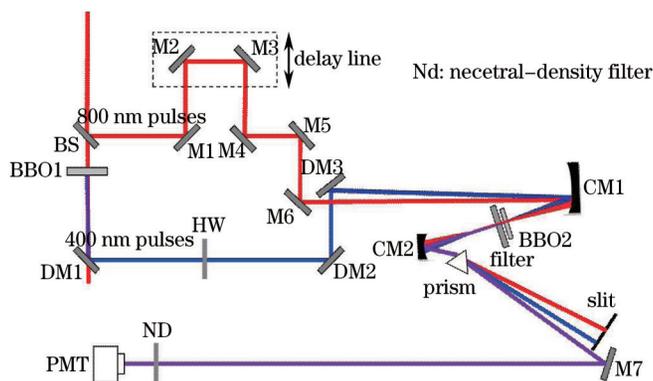


图 4 飞秒脉冲三阶相关测量实验装置图

Fig.4 Schematic diagram of the third-order correlation measurement system

位匹配方式为I类匹配,匹配角为 $29.2^\circ$ ),然后通过3个对800 nm光高透、对400 nm光高反的二向色镜(DM1, DM2, DM3)将800 nm剩余光滤除,光路中插入半波片(HW)的目的是为了使倍频光的偏振方向旋转 $90^\circ$ ,从而与基频光相同;由分束镜反射的另一束较弱的800 nm基频光,通过一个可调的光学延迟系统后与400 nm倍频光共同入射到一个凹面反射镜(CM1,  $f=200$  mm)上,并被聚焦到 $100\ \mu\text{m}$ 厚的和频晶体(BBO2)中,其相位匹配方式也是I类匹配,匹配角为 $44.3^\circ$ 。由和频晶体产生的266 nm的三次谐波经过一个窄带干涉滤光片和另一个凹面聚焦反射镜(CM2,  $f=100$  mm)的准直后,通过棱镜分光,最终将266 nm的信号光通过高反镜(M7)导入光电倍增管(PMT)。测量时,PMT前加入一组不同倍数的衰减片对信号进行衰减。通过计算机控制平移台来调节不同时间延迟,同时记录三阶相关信号的强度,就可得到随时间变化的三阶相关曲线。

实验中首先使用一台二阶自相关仪(SSA, Positive Light Inc.)测量掺钛蓝宝石飞秒激光系统输出的激光脉冲的脉宽约为50 fs。为了得到共线和非共线两种情况下的测量结果,可以调节光路中的反射镜M6和二向色镜DM3使两束光重合或者形成一定的角度 $\theta$ 。在BBO2处两束光和频时,为避免打坏晶体,将BBO晶体放置在CM1焦点前的某个位置,此时晶体上聚焦的光斑直径 $d$ 大小大约为2 mm。在共线和非共线(夹角 $\theta=1^\circ$ )两种情况下测量得到的三阶相关曲线如图5所示。其中虚线为共线情况下测量结果,三阶相关曲线宽度约为78 fs,实线为非共线情况下测量结果,三阶相关曲线宽度约为146 fs。两种方式测量的结果均比之前的理论计算结果稍大,这除了与脉冲在通过测量系统时脉宽有所展宽有关以外,对于非共线的测量结果增大还可能是光斑的大小及光束夹角所带来的误差引起。实验结果充分表明,非共线式扫描三阶相关仪测量得到的脉宽与光斑大小和入射角有很大关系。横向空间延时效应展宽了脉冲宽度的测量值,此时不能简单地以共线情况下的比值关系 $\Delta\tau/\Delta t=1.225$ 来计算脉冲宽度值。如果想得到准确的脉宽值,则需要准确测量光斑大小和非共线夹角,再通过(5)式解出待测脉冲的宽度。由图3给出的理论计算结果可知,光斑大小和入射光夹角的微小变化就能引起较大的脉宽变化,因此,由于测量所带来的误差会使计算出的脉宽值也有较大的误差。因而在利用非共线式三阶相关仪测量脉冲宽度时,应该尽量减小光斑尺寸和入射夹角,或者在非线性晶体后面加入狭缝的办法来减小或避免这种展宽效应。若不能完全避免,则在测量时应充分考虑光斑直径和入射夹角所引起的展宽量,进而得到准确的脉宽测量值。

从以上分析可知,与非共线方式相比,共线式扫描三阶相关仪可以得到比较准确的脉冲宽度测量。但是,由于在共线和频时,800 nm基频光聚焦后在光学介质材料(甚至空气)中会通过三倍频过程直接产生三次谐波,与和频产生的266 nm光混合在一起,通过后面的滤光片和棱镜也无法将其消除,且强度不随延迟时间改变。这就造成了测量结果会出现一个较高的本底信号,直接影响了测量信号的动态范围。而非共线式扫描三阶相关测量由于在空间上3个波长的光已经分开,所以经过后面的滤光片、棱镜和狭缝等措施可以将信号对比度大幅提高。

图6是用共线和非共线两种方式测量得到的扫描三阶相关曲线。图中时间负值表示脉冲前沿,在扫描曲线的前段约-65 ps处,将800 nm或400 nm其中一束光挡住,此时没有和频信号,探测器只接收来自系统的

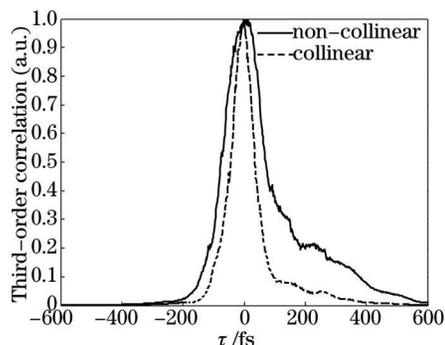


图5 共线与非共线三阶相关测量曲线的比较

Fig.5 Comparison of measured third-order autocorrelation traces with collinear and non-collinear methods

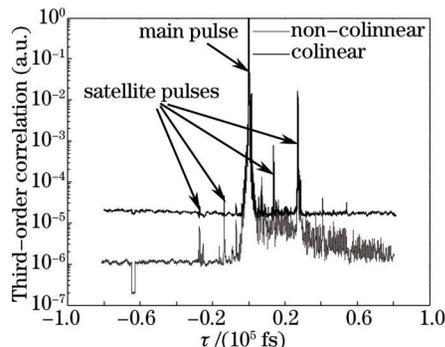


图6 共线和非共线情况下,分别测得的50 fs激光脉冲的三阶相关曲线

Fig.6 Time-scanning curves of third-order correlator with collinear and non-collinear methods

噪声信号,以此来标定三阶相关仪的测量动态范围,即信噪比。从图中可看出,共线扫描时测量的动态范围不足  $10^5$ ,由于 800 nm 直接三倍频产生的噪声信号强度已经超出了和频产生的 266 nm 光信号强度,因而无法测出能量较小的脉冲。而非共线扫描时可得到  $10^7$  的动态范围,比共线时提高了 2 个数量级。此时能够看出的激光脉冲的对比度大约为  $10^6$ ,且脉冲后延有持续时间很长的振荡信号,这说明此时的激光器并没有工作在最优的状态。从前面的理论分析知道,无论是共线还是非共线测量方式,都不会影响次脉冲相对主脉冲时间间隔的判定,只是脉冲的相关曲线宽度会有所不同,因此可以根据三阶相关曲线上次脉冲出现的位置来推断待测激光脉冲的情况。图 6 中出现在主脉冲前后约 13.7 ps 和 27.2 ps 位置处的次峰是由于光路中的半波片和分束镜(厚度为 3 mm)材料表面的二次反射形成的。因为这些信号的来源和位置已经确定,因此不影响脉冲对比度测量的分析。

## 5 结 论

通过理论计算分析,并利用实验室搭建的扫描式三阶相关仪研究了共线和非共线两种方式对飞秒激光脉冲的扫描测量结果。共线式相关测量可以得到相对准确的脉冲宽度值,但具有较低的测量动态范围。而非共线式相关则相反,具有较高的测量动态范围但脉宽测量值受到横向空间延时效应的影响,与聚焦的光斑大小及入射夹角有关。两种测量方式均不影响对次脉冲中心位置的判断,但由于非共线方式脉冲扫描宽度的增加,主脉冲附近的小脉冲结构或者彼此距离较近的两个脉冲会连接到一起不容易分辨。因此,在实际应用中,应该根据测量的目的和要求选择合适的三阶相关测量方式。如果仅需要准确测量脉冲宽度时,则应使用共线测量方式。而需要测量较大时间范围内的脉冲对比度时,应选择非共线方式。此外,为了减小非共线情况下的空间延时展宽效应,应该在考虑不超出非线性晶体损伤阈值的前提下尽量减小聚焦到和频晶体中的光斑尺寸和入射光束夹角。

## 参 考 文 献

- 1 A Braun, J V Rudd, H Cheng, *et al.*. Characterization of short-pulse oscillators by means of a high-dynamic-range autocorrelation measurement[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(18): 1889-1891.
- 2 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.
- 3 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.*. Analysis on reliability of diagnostics system for picosecond petawatt laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0108003.  
欧阳小平, 杨琳, 彭永华, 等. 皮秒拍瓦激光的参数测量系统可靠性分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0108003.
- 4 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.
- 5 M Aoyama, A Sagisaka, S Matsuoka, *et al.*. Contrast and phase characterization of a high-peak-power 20-fs laser pulse[J]. *Appl Phys B*, 2000, 70(7): 149-153.
- 6 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.
- 7 Wang Yuyu, Ouyang Xiaoping, Yang Lin, *et al.*. Measurement of ultrashort high-power laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1208002.  
王宇煜, 欧阳小平, 杨琳, 等. 高功率超短激光脉冲特性的三阶相关测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1208002.
- 8 Ma Jingui, Wang Yongzhi, Yuan Peng, *et al.*. Single-shot pulse-contrast measurement for high-intensity lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080008.  
马金贵, 王永志, 袁鹏, 等. 高强度激光脉冲信噪比的单次测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080008.
- 9 D J Kane, R Trebino. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(10): 823-825.

- 10 L Gallmann, G Steinmeyer, D H Sutter, *et al.*. Collinear type II second-harmonic-generation frequency-resolved optical gating for the characterization of sub-10 fs optical pulses[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(4): 269-271.
- 11 C Iaconis, I A Walmsley. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultra-short optical pulses[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(10): 792-794.
- 12 E J Divall, I N Ross. High dynamic range contrast measurements by use of an optical parametric amplifier correlator[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(19): 2273-2275.
- 13 Sun Zhihong, Xia Yanwen, Liu Hua, *et al.*. Contrast ratio measurement of single shot picosecond pulse using third order noncollinear autocorrelation technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1852-1856.  
孙志红, 夏彦文, 刘 华, 等. 单次皮秒脉冲对比度的三阶自相关法测试技术[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1852-1856.
- 14 C Dorrer, J Bromage, J D Zuegel. High-dynamic-range single-shot cross-correlator based on an optical pulse replicator[J]. *Opt Express*, 2008, 16(18): 13534-13544.
- 15 D C Edelstein, E S Wachman, L K Cheng, *et al.*. Femtosecond ultraviolet pulse generation in  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>[J]. *Appl Phys Lett*, 1988, 52(26): 2211-2213.
- 16 A P Baronavski, H D Ladouceur, J K Shaw. Analysis of cross correlation, phase velocity mismatch, and group velocity mismatches in sum-frequency generation[J]. *IEEE Quantum Electron*, 1993, 29(2): 580-589.
- 17 R Trebino. *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000: 146-149.

栏目编辑: 宋梅梅