

doi:10.3788/gzxb20144311.1114003

# 自相关法测量飞秒激光双脉冲若干参量的研究

徐振新<sup>1</sup>, 杨晓苹<sup>1</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 杨勇<sup>3</sup>, 马忠洪<sup>3</sup>, 孙旭娜<sup>1</sup>, 翟宏琛<sup>3</sup>

(1 天津理工大学 电子信息工程学院, 天津 300384)

(2 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

(3 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:**飞秒激光双脉冲在研究光泵浦的超快瞬态过程领域具有重要的应用价值, 如何实现高准确度的飞秒激光双脉冲的实时测量显得尤为重要. 本文提出了一种基于自相关法的飞秒激光双脉冲参量的测量方法, 可实现对共光路传输、具有飞秒至皮秒级时间间隔的飞秒激光双脉冲的脉冲间隔、脉冲宽度和强度比的实时测量. 实验中采用自相关仪测得了双折射晶体(钽酸钷)分束出的飞秒激光双脉冲的自相关曲线, 并用非线性拟合算法求得了飞秒激光双脉冲的脉冲间隔、脉冲宽度和强度比参量. 实验结果表明, 本文方法与互相关测量方法相比, 克服了参考脉冲参量的不确定性对检测准确度的影响, 使测量平均准确度提高了 48% 以上.

**关键词:**激光光学; 超快激光; 超快测量; 激光脉冲; 超短脉冲; 脉冲质量; 脉冲间隔; 脉冲宽度

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1114003-5

## Femtosecond Laser Double Pulse Autocorrelation Measurements and Research of Fitting Method

XU Zhen-xin<sup>1</sup>, YANG Xiao-ping<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, YANG Yong<sup>3</sup>, MA Zhong-hong<sup>3</sup>,  
SUN Xu-na<sup>1</sup>, ZHAI Hong-chen<sup>3</sup>

(1 School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(3 Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Femtosecond laser double-pulse has important application value on the study of ultra-fast transient process area. How to realize the high accuracy of femtosecond laser pulse real-time measurement is particularly important. This paper presents a method on autocorrelation of femtosecond laser double-pulse measurement. It contains the measurement techniques of pulse interval, pulse width and the intensity ratio. Autocorrelator was used in the experiment to get the autocorrelation curve of the femtosecond laser double-pulse. The femtosecond laser double-pulse were generated by the birefringent crystal. Relying on the autocorrelation curve, the pulse interval, pulse width and the intensity ratio were got by non-linear fitting method. Contrasted the traditional cross-correlation measurement, the autocorrelation method overcome the uncertainty of the independent pulse impact on accuracy. It makes the measuring precision could be improved by more than 48% on average.

**Key words:** Laser optics; Ultrafast lasers; Ultrafast measurements; Laser beams; Ultrashort pulses; Beam quality; Pulse interval; Pulse width

**OCIS Codes:** 140.7090; 140.3538; 320.0320; 320.7090; 320.7100

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究项目(No. 61227010)资助

第一作者: 徐振新(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超快全息. Email: xuzhenxinde@163.com

导师(通讯作者): 杨晓苹(1962-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为光学信息处理. Email: yangxiaoping@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2014-04-14; 录用日期: 2014-05-23

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

由于飞秒激光具有高瞬间功率、高靶向聚焦定位准确度和超短脉冲宽度等特点,在微加工和超快过程探测等领域被广泛应用<sup>[1-5]</sup>.其中,通过对飞秒激光双脉冲泵浦的超快瞬态过程的研究,可获得许多物质结构变化或能量转化等领域的重要结果<sup>[6-9]</sup>,而飞秒激光双脉冲的脉冲参量(脉冲宽度、脉冲间隔和能量等)在这些研究中都是极其重要的影响因素.此时,如何实现飞秒激光双脉冲的脉冲参量的实时高准确度测量显得尤为重要.

目前,对飞秒激光的脉冲参量测量的方法主要有自相关检测法<sup>[10]</sup>,频率光学门法(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)<sup>[11]</sup>,光谱相位相干直接电场重构法(Spectral Phase Interferometry For Direct Electric-Field Reconstruction, SPIDER)<sup>[12]</sup>和互相关检测方法<sup>[13]</sup>.传统的自相关检测法, FROG与SPIDER仅适用于单脉冲的测量<sup>[14]</sup>.而互相关检测法适合检测长序列、多脉冲的参量,然而其需要对事先分出的参考脉冲参量进行测试<sup>[13]</sup>,因此其测试的不确定性会对整个系统的检测准确度产生较大影响.

在现有的激光脉冲参量测量技术中,自相关法具有技术成熟、准确度高的特点,为了克服该技术无法对飞秒激光双脉冲进行检测的问题,本文提出了一种基于自相关法的具有飞秒级时间间隔的飞秒激光双脉冲参量实时测量的方法,可实现飞秒激光双脉冲的脉冲间隔、脉宽以及强度比等多参量的测量.与互相关法相比,由于无需预先测试参考端的脉冲的相关参量,减少了影响检测准确度的因素,因此本文所提方法具有更高的检测准确度.

## 1 原理

自相关法的测量原理是将脉冲的时域分布转化为脉冲的空域分布,通过倍频将倍频光与入射脉冲进行二阶自相关运算,根据入射光脉冲波形,计算出飞秒激光脉冲的宽度.

对于飞秒激光双脉冲的测量,若已知每个脉冲强度的空域分别为高斯型,如图1所示为两个时间延迟

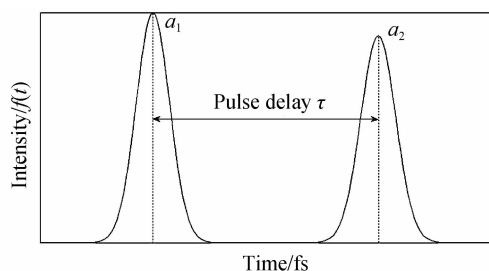


图1 分束后的两个飞秒脉冲  
Fig. 1 Two femtosecond pulses after splitting

为  $\tau$  的飞秒激光脉冲,其时间强度分布可以表示为

$$I(t) \propto a_1 e^{-t^2/c_1^2} + a_2 e^{-(t-\tau)^2/c_2^2} \quad (1)$$

式中  $c_1$  和  $c_2$  分别表示两个脉冲的半高宽系数,  $\tau$  是两个脉冲之间的时间延迟,  $a_1$  和  $a_2$  分别为正比于脉冲强度的系数.

这两个飞秒脉冲经过自相关运算,可获得自相关曲线如图2.

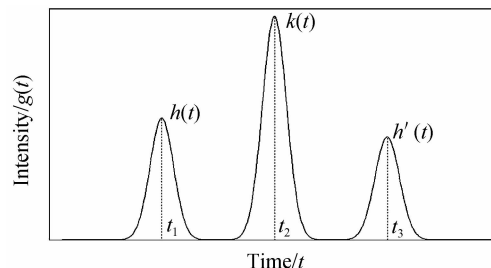


图2 双脉冲的自相关曲线理论值  
Fig. 2 Theoretical autocorrelation curve of double-pulse

由于自相关曲线值正比于脉冲函数的卷积,则图(2)中自相关曲线的旁瓣分别是两个高斯型函数的自相关函数,其形式仍为高斯函数,但中间的主峰是两个高斯函数自相关后的叠加,因此,它不是一个高斯函数,而仅仅是一个类高斯函数.

自相关函数可表示为

$$g(t) \propto I(t) \star I(t) \quad (2)$$

式中  $g(t)$  表示双脉冲的自相关函数,  $I(t)$  表示脉冲的函数,  $\star$  表示自相关运算符号.旁瓣和主峰的时间强度分布表达式分别表示为

$$h(t) = (a_1 e^{-t^2/c_1^2}) \star (a_2 e^{-t^2/c_2^2}) \quad (3)$$

$$k(t) = (a_1 e^{-(t-\tau)^2/c_1^2}) \star (a_1 e^{-(t-\tau)^2/c_1^2}) + (a_2 e^{-(t-\tau)^2/c_2^2}) \star (a_2 e^{-(t-\tau)^2/c_2^2}) \quad (4)$$

$$h'(t) = [a_1 e^{-(t-2\tau)^2/c_1^2}] \star [a_2 e^{-(t-2\tau)^2/c_2^2}] \quad (5)$$

式中  $h(t)$  和  $h'(t)$  表示旁瓣的自相关曲线,  $k(t)$  表示主峰的自相关曲线.

从式(3)和式(4)中可以看出,双脉冲的脉冲间隔  $\tau$  是主峰与旁瓣极值点之间横坐标之差的绝对值,因此,从自相关曲线上,可以直接通过计算得到双脉冲的脉冲间隔  $\tau$ ,其表达式为

$$\tau = \frac{|t_2 - t_1| + |t_3 - t_2|}{2} \quad (6)$$

式中  $t_1$ ,  $t_2$  和  $t_3$  分别表示旁瓣和主峰极值点的横坐标值,可通过自相关曲线的极值点得到.

式(3)和式(4)分别为两个卷积方程,由于无法获得解析解,只能获得数值解,因此,本文采用非线性拟合的方法,即通过使拟合曲线与原曲线的方差最小的方法来求解(即最小二乘法原理).

已知主峰函数是两个脉冲自相关函数的叠加,构建两个高斯函数为

$$f_1(t) \propto b_1 e^{-t^2/d_1^2} = (a_1 e^{-t^2/c_1^2}) \star (a_1 e^{-t^2/c_1^2}) \quad (7)$$

$$f_2(t) \propto b_2 e^{-t/d_2} = (a_2 e^{-t/c_2}) \star (a_2 e^{-t/c_2}) \quad (8)$$

则主峰的自相关曲线为

$$k(t) = b_1 e^{-t/d_1} + b_2 e^{-t/d_2} \quad (9)$$

考虑到实际实验中存在背景光,因此,必须在主峰的自相关函数中加上背景光强度  $h$ ,则最终主峰自相关函数可表示为

$$k(t) = b_1 e^{-t/d_1} + b_2 e^{-t/d_2} + h \quad (10)$$

式中存在  $b_1, b_2, d_1, d_2$  和  $h$  五个未知数,使用非线性拟合的方法(通过对旁瓣的拟合求得  $d_1$  和  $d_2$  的关系后即可拟合出主峰的函数),即可计算出该 5 个未知参量,同时也可由它们近似地得到脉冲宽度和脉冲强度之比为

$$c_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} d_1, c_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} d_2 \quad (11)$$

$$\theta = \frac{a_1}{a_2} = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad (12)$$

式中  $\theta$  表示脉冲的强度比。

通过上述理论分析可知,本文所述方法可实现飞秒激光双脉冲的间隔  $\tau$ 、每个脉冲的脉宽( $c_1$  和  $c_2$ )以及强度比( $\theta$ )的测量。

本文所提方法继承了自相关测量方法的便捷、准确度高的优点,而在传统的可实现多脉冲测量的互相关测量方法中,由于需要对参考臂端的脉冲预先进行测试,而其检测准确度会直接影响互相关法的检测准确度<sup>[13]</sup>,因此相较于本文所提出的方法,在测试准确度上会有明显的不足。

## 2 实验及结果

飞秒激光双脉冲分束方法包括使用分光平片,利用光栅<sup>[15]</sup>或者是采用双折射晶体<sup>[16]</sup>等。本文采用了晶体分束的方法。如图 3,将一个偏振状态与双折射晶体光轴方向呈  $45^\circ$  的线偏振的飞秒级激光脉冲垂直入射通过双折射晶体,从而分成两个具有一定时间间隔、偏振状态相互垂直且共线传输的飞秒激光双脉冲,然后通过一个对应波长的半波片,使之满足相位匹配条件后进入自相关仪,获得自相关曲线。若所分脉冲的时间间隔为  $\tau$ ,则  $\tau$  可以表示为

$$\tau = \frac{d}{c} |n_o - n_e| \quad (13)$$

式中  $d$  表示晶体的厚度, $c$  表示光速, $n_o$  和  $n_e$  分别代表双折射晶体中快轴和慢轴的折射率。本实验装置中采用钽酸铋双折射晶体,其厚度  $d$  约为 2 mm,激光器波长约为 800 nm,快慢轴折射率之差  $\Delta n$  约为 0.213 8,因此,理论上所计算出的分束时间间隔  $\tau$  约为 1.425 ps。

利用图 3 所示的实验系统,对双折射晶体分束产生的双脉冲进行了检测,检测得到的双脉冲自相关曲

线如图 4。其横坐标为脉冲的时序  $t$ ,纵坐标为脉冲的归一化强度系数  $g(t)$ 。

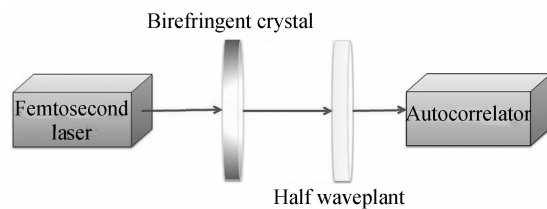


图 3 实验平台原理

Fig. 3 The schematics of experiment platform

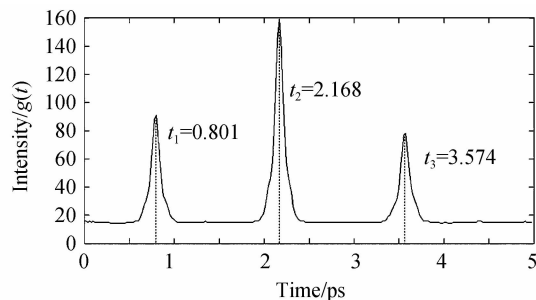


图 4 实验测得双脉冲自相关曲线

Fig. 4 The double-pulse autocorrelation curve measured by the experiment

由图(4)可以得到 3 个峰的横坐标值分别为  $t_1 = 0.801$  ps、 $t_2 = 2.168$  ps 和  $t_3 = 3.574$  ps,由式(6)可计算得到脉冲的脉冲间隔  $\tau$  约为 1.387 ps。

对于以上的实验所得的自相关曲线,采用本文所提的非线性拟合法(即是对旁瓣的拟合求得旁瓣宽度间的关系后拟合得出主峰的函数)可以得到  $a_1 = 8.66$ ,  $a_2 = 8.24$ ,  $c_1 = 0.079$ ,  $c_2 = 0.086$ ,  $h = 15.43$ 。

根据式(12),可以计算出两个脉冲的强度比为 1.051,根据式(11),可以计算出两个脉冲的脉冲宽度分别为 56 fs 和 61 fs,背景光强度参量为 15.43。所拟合出的自相关曲线和原自相关曲线相比如图 5。

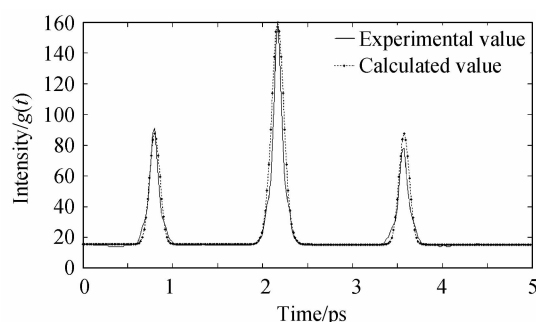


图 5 拟合出的自相关曲线和实验测得自相关曲线的对比  
Fig. 5 The contrast of the measured curve and the fitting curve

双脉冲的脉冲时序函数为

$$f(t) = 8.66e^{-t^2/0.0062} + 8.24e^{-(t-1.387)^2/0.0074} \quad (14)$$

所拟合出的双脉冲函数图像如图 6。

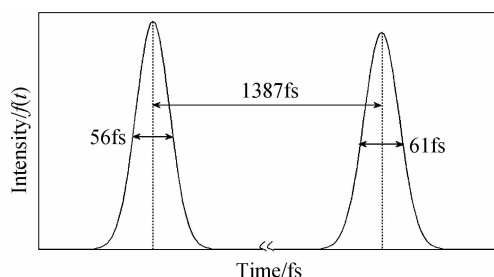


图6 还原后双脉冲函数图像

Fig. 6 The restore image of the double-pulse

为了对比互相关法的实验结果,在自相关法测试结束之后,搭建了如图7所示的互相关测试平台。

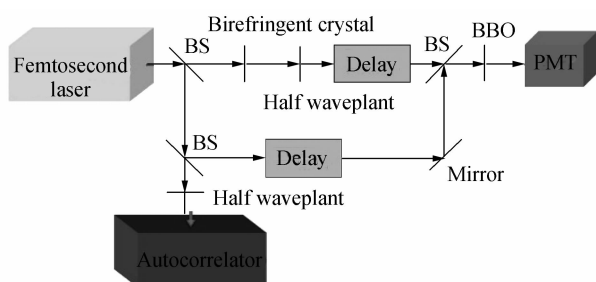


图7 互相关实验平台原理

Fig. 7 The schematics of cross-correlation experiment platform

如图7所示,在互相关实验的参考臂端,直接用自相关仪测得了参考臂端的脉冲宽度,测量值约为54 fs.因此,在已知参考臂脉冲脉宽的前提下,可以通过对互相关曲线的求解得到双脉冲的脉冲宽度约为49 fs和53 fs.

为了验证实验结果,在之后的实验中测试了激光器出射单脉冲的自相关曲线.解自相关曲线可以得到激光器出射脉冲的脉宽约为52 fs.根据双折射晶体的材料、尺寸和二分之一波片的厚度,可以计算出出射的寻常光脉冲a与非寻常光脉冲b的展宽量约为10 fs和12 fs,其中,由晶体和半波片本身加工误差所计算得到脉冲a和b的展宽误差量约为3 fs.因此,理论上得到的脉宽数值大约为 $62 \pm 3$  fs和 $65 \pm 3$  fs,与自相关法实测值56 fs和61 fs相比,分别存在有3~9 fs和10~16 fs的误差.但是,与互相关方法测得双脉冲宽度49 fs和53 fs相比,极限情况下的误差分别缩小了7 fs和8 fs.如表1所示,自相关检测方法较互相关检测方法,使测试平均误差减小了48%以上.考虑到商用的自相关仪测量准确度一般都在5 fs左右,因此,可以认为本方法能够较为精确地测量飞秒激光双脉冲的脉冲宽度参量.

从实验所得自相关曲线和拟合出的自相关曲线的对比中可以看出,非线性拟合的方法测量双脉冲的结构参量可以一定程度上降低实验中不可避免的误差及其他因素的影响,能够得到相对准确的脉冲间隔和强

表1 自相关法与互相关法测量对比

Table 1 The comparison of autocorrelation measurement and cross-correlation measurement

Detection method	Autocorrelation method	Cross-correlation method
Measurement value of pulse a	56 fs	49 fs
Measurement value of pulse b	61 fs	53 fs
Theoretical value of pulse a	$62 \pm 3$ fs	$62 \pm 3$ fs
Theoretical value of pulse b	$65 \pm 3$ fs	$65 \pm 3$ fs
Error value of pulse a	3~9 fs	10~16 fs
Error value of pulse b	1~7 fs	9~15 fs
Reduction of pulse a/%	43.75% ~70.00%	
Reduction of pulse b/%	53.33% ~88.89%	
Reduction/%	48.54% ~79.45%	

度分布参量.虽然本文中仅测试了脉冲间隔只有1.387 ps的一对脉冲,但是,在实际使用中,本文所提方法也适用于更宽或者更窄脉冲间隔的脉冲对测试,其测量的脉冲间隔范围介于脉冲宽度和自相关仪扫描范围之间.如今,市面上所售商用自相关仪扫描范围普遍为50 ps,但如果需要测试脉冲间隔更大的双脉冲,可以通过对商用自相关仪的改进或者自制扫描范围更大的自相关仪来实现.

### 3 结论

本文提出了一种通过自相关仪得到的双脉冲的自相关曲线求得双脉冲的脉冲间隔、脉冲宽度和强度比的方法.首先由双折射晶体分束得到了飞秒激光双脉冲,利用自相关仪得到该双脉冲的自相关曲线,再采用非线性拟合方法得到了双脉冲的脉冲时序函数,最终测量出激光双脉冲的脉冲间隔、脉宽和强度比.与互相关测量法相比,本文提出的方法不需要预先采用自相关法检测参考臂脉冲,因此使得影响最终检测准确度的因素减少,测量准确度较互相关法平均提高了48%以上.此外,本文所提方法也可用于4个脉冲相关参量的测量.可通过在测试过程中加入偏振片滤去一个方向的偏振光的方法测出多脉冲两两之间的脉冲参量(脉冲间隔、脉冲宽度和强度比).

#### 参考文献

- [1] ZHANG Nan, YANG Jing-hui, ZHU Xiao-nong. Investigation of ultrafast process of femtosecond laser ablation of highly oriented pyrolytic graphite[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(5): 0503002.  
张楠, 杨景辉, 朱晓农. 飞秒激光烧蚀高定向热解石墨的超快过程研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0503002.
- [2] HU Hao-feng, WANG Xiao-lei, GUO Wen-gang, et al. Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1):

017901.  
胡浩峰, 王晓雷, 郭文刚, 等. 强飞秒激光烧蚀石英玻璃的超快时间分辨光学诊断[J]. 物理学报, 2011, **60**(1):017901.
- [3] ZHANG Jing-guo, LIANG Xiao-geng, LIU Jian-xin, *et al.* Effect of pulse width on clode-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1422-1426.  
张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 脉冲宽度对云雾回波的影响研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(12):1422-1426.
- [4] SU Shi, AN Zhi-yong, LIANG Wei, *et al.* Comparisons and analysis of drilling experiment using different pulse laser waveforms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 565-570.  
苏拾, 安志勇, 梁伟, 等. 不同脉冲激光波形在打孔实验上的比较与分析[J]. 光子学报, 2012, **41**(5):565-570.
- [5] ALSHERSHBY M, REN Y, QIN J, *et al.* Diagnosis of femtosecond plasma filament by channeling microwaves along the filament[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(20): 204104.
- [6] DERRIEN T J, KRUEGER J, ITINA T E, *et al.* Rippled area formed by surface plasmon polaritons upon femtosecond laser double-pulse irradiation of silicon[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24): 29643-29655.
- [7] BARBEROLOU M, TSIBIDIS G D, GRAY D, *et al.* The influence of ultra-fast temporal energy regulation on the morphology of si surfaces through femtosecond double pulse laser irradiation[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2013, **113**(2): 273-283.
- [8] WU Si-zhu, WU Dong, XU Jian, *et al.* Absorption mechanism of the second pulse in double-pulse femtosecond laser glass microwelding[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(20): 24049-24059.
- [9] HE Feng-tao, ZHOU Qiang, YANG Wen-zheng, *et al.* Femtosecond laser multi-beam interference lithography anti-reflective microstructure on silicon surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 515-520.
- 贺锋涛, 周强, 杨文正, 等. 飞秒激光多光束干涉光刻硅表面减反微结构[J]. 光子学报, 2013, **42**(5):515-520.
- [10] WANG Xing-tao, YIN Ding-jun, SHUAI Bin, *et al.* Measure ultrashort pulse width with total reflection second - order autocorrelation[J]. *Chinese Journal of 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宽度[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 1018-1020.
- [11] 李文斌. 二次谐波频率分辨光学快门法测量超短脉冲[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008:23-31.
- [12] LIU Jun, WEN Jin-hui, ZHANG Yan-wei, *et al.* Applicability problem in characterization of femtosecond pulses with spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction[J]. *Chinses Journal of Lasers*, 2009, **36**(5): 1175-1179.  
刘俊, 文锦辉, 张燕伟, 等. 光谱相位相干直接电场重构法测量飞秒脉冲的适用性问题[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1175-1179.
- [13] VARDANYAN A O. Multibeam cross-correlation method of measurement of spectral and temporal characteristics of femtosecond laser pulses[C]. SPIE, 2004, **5580**: 725-729.
- [14] 邓杨保. 激光脉冲的测量技术及分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 6-31.
- [15] WU Jun, ZHOU Chang-he, CAO Hong-chao. Beam splitting of a double-groove fused-silica grating under normal incidence [J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(11): 115703.
- [16] DROMEY B, ZEPF M, LANDREMAN M, *et al.* Generation of a train of ultrashort pulses from a compact birefringent crystal array [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5142-5146.