

# 频率分辨光学开关迹线的去噪技术

孙上傲<sup>1</sup>, 张留洋<sup>1</sup>, 曲玉秋<sup>2</sup>, 杨莹<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学应用科学学院光电信息科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150080;

<sup>2</sup>黑龙江大学物理科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 在分析实际频率分辨光学开关(FROG)迹线噪声来源的基础上,设计了一种合理的去噪程序;对含模拟噪声的FROG迹线分别进行直接重建和去噪后重建,两者均方值误差相差一个数量级,证明了该去噪程序的有效性;搭建了FROG系统,获得了实际脉冲的FROG迹线,通过对直接重建和去噪后重建的结果进行对比分析,发现去噪后重建的脉冲更接近真实的脉冲,证明了噪声处理的必要性。

**关键词** 超快光学;超短脉冲测量;频率分辨光学开关系统;噪声处理

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.093201

## Noise-Removing Technology of Frequency-Resolved Optical Gating Traces

Sun Shang'ao<sup>1</sup>, Zhang Liuyang<sup>1</sup>, Qu Yuqiu<sup>2</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, College of Applied Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

<sup>2</sup>College of Physics Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** Based on the analysis of noise sources in the practical frequency-resolved optical gating (FROG) traces, a reasonable program to remove noises is designed. The direct reconstruction and the reconstruction after noise removing are conducted for the FROG traces with the analogue noises, respectively. The root-mean-square error of the latter is lower by one order of magnitude than that of the former, which confirms that this noise-removing program is effective. The FROG system is set up and the FROG trace of a practical pulse is obtained. By analyzing and comparing the results obtained from these two reconstruction ways, it is found that the reconstructed pulse obtained by the noise removing way is much closer to the real pulse, which verifies the necessity of noise removing.

**Key words** ultrafast optics; ultrashort pulse measurement; frequency-resolved optical gating system; noise processing

**OCIS codes** 320.5550; 320.7100

## 1 引言

超短激光脉冲具有能量高、脉宽小等特点,被广泛应用于诸多领域<sup>[1]</sup>。在实际应用中,需要精确测量脉冲的强度和相位信息<sup>[2-4]</sup>。频率分辨光学开关(FROG)技术可以给出脉冲宽度、波形、相位和啁啾等脉冲信息,是一种广泛应用的脉冲测量技术。在利用FROG技术测量超短脉冲时,衍射和电荷耦合元件(CCD)成像的缺陷会在拍摄FROG迹线的过程中引入噪声<sup>[5]</sup>。如果直接对其进行重建,恢复出的脉冲信息可能会在一定程度上偏离真实值。本文基于MATLAB软件,进行了FROG迹线的去噪技术研究,从实验和理论两方面证明了噪声去除的必要性和有效性。

**收稿日期:** 2017-03-24; **收到修改稿日期:** 2017-04-27

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金(F2016023)

**作者简介:** 孙上傲(1991—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光测量方面的研究。E-mail: 391848230@qq.com

**导师简介:** 张留洋(1981—)男,博士,副教授,主要从事超快光学和光学设计方面的研究。

E-mail: johnien@163.com(通信联系人)

## 2 FROG 法测量超短脉冲的基本原理

### 2.1 二次谐波分辨光学开关(SHG-FROG)法的基本原理

典型的 SHG-FROG 系统<sup>[6-8]</sup>如图 1 所示。其光路结构类似迈克耳孙干涉仪光路结构,待测脉冲经分束器被分成两束,利用可控平移台使其中一束光产生时间延迟  $\tau$ ,若该束光的电场振幅为  $E(t)$ ,则另一束光的电场振幅为  $E(t-\tau)$ 。两束光经透镜会聚在倍频晶体上,产生倍频信号  $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 。对于 SHG-FROG,有

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau)。 \quad (1)$$

探测器记录的是 FROG 迹线,其光强分布可表示为

$$I^{\text{FROG}}(\omega, t) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为角频率。从(2)式可知,FROG 迹线中包含了脉冲的频率及相位信息,通过对其进行反演可获得唯一的脉冲表达式。

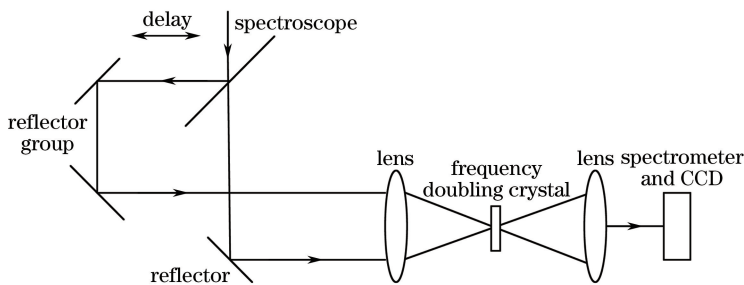


图 1 SHG-FROG 系统

Fig. 1 SHG-FROG system

### 2.2 简化的 FROG 系统

图 2 所示为简化的 FROG 系统(单发 FROG<sup>[9-11]</sup>)示意图,其中  $\lambda$  为波长;菲涅耳双棱镜替代了传统 FROG 法中的分光镜,并在其中引入了时间延迟;较厚的偏硼酸钡(BBO)倍频晶体替代了传统 FROG 法中较薄的 BBO 晶体,该倍频晶体既能够起到分光计的作用,又降低了设备的复杂程度。简化的 FROG 的基本原理和传统 FROG 的相同,只是在实验装置上进行了很大程度的简化,单发 FROG 技术本质上即为 SHG-FROG。

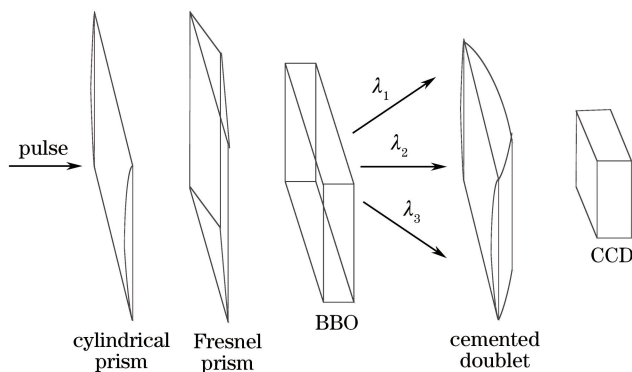


图 2 简化的 FROG 系统

Fig. 2 Simplified FROG system

### 2.3 脉冲重建算法

主元素广义投影算法(PCGPA)是一种脉冲重建算法,速度快、收敛性好<sup>[11-15]</sup>。假设初始脉冲为  $E(t)$ ,对脉冲电场产生的信号电场  $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 作关于时间的傅里叶变换(FFT),得到频域信号电场  $E_{\text{sig}}(\omega, \tau)$ ;利用限制条件(2)式,用实验得到的 FROG 图像的强度进行修正,对修正后的频域信号电场  $E'_{\text{sig}}(\omega, \tau)$ 作逆傅里叶变换(IFFT),得到时域电场  $E'_{\text{sig}}(t, \tau)$ ;利用限制条件(1)式和时域信号电场,得到下一次迭代的初始电场  $E(t)$ <sup>[16-18]</sup>;反复迭代,直到找到在允许误差之内的脉冲电场。基于 PCGPA 算法的思想,编写了脉冲重建程序。

### 3 FROG 迹线的噪声处理

#### 3.1 理想 FROG 迹线的数值模拟

根据(2)式,可通过矩阵外积和行列变换的方法得到 FROG 迹线的光强分布。由于实验室中搭建的 FROG 系统的时间分辨率为 3.37 fs/pixel,因此对  $E(t)$  离散的时间间隔为 3.37 fs。由于时域  $\Delta\tau$  和频域  $\Delta\lambda$  采样应满足傅里叶变换关系,则  $\Delta\lambda=1.24$  nm,即波长分辨率为 1.24 nm/pixel。以脉宽为 80 fs 的高斯脉冲为例,用 MATLAB 软件数值模拟 FROG 迹线生成的过程,如图 3 所示。对待测脉冲和门脉冲进行时间采样,将待测脉冲离散为两个向量,其外积形式如图 3(a)所示,对其进行列变换和傅里叶变换后可得图 3(d)所示的 FROG 迹线。

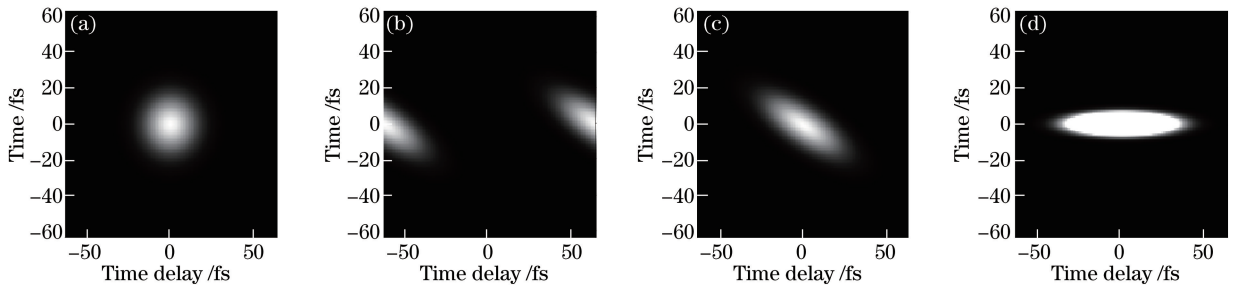


图 3 FROG 迹线的数值模拟过程。(a)矢量外积;(b)行列变换;(c)列移动;(d)傅里叶变换

Fig. 3 Numerical simulation process of FROG traces. (a) External product of vectors; (b) row-column transformation; (c) column shifting; (d) Fourier transformation

#### 3.2 重建算法对理想 FROG 迹线的重建

将数值模拟的理想 FROG 迹线即图 3(d)代入 PCGPA 算法中,取猜测脉冲为 200 fs 的高斯脉冲,迭代次数设定为 100,恢复后的脉冲强度和相位如图 4(a)所示。

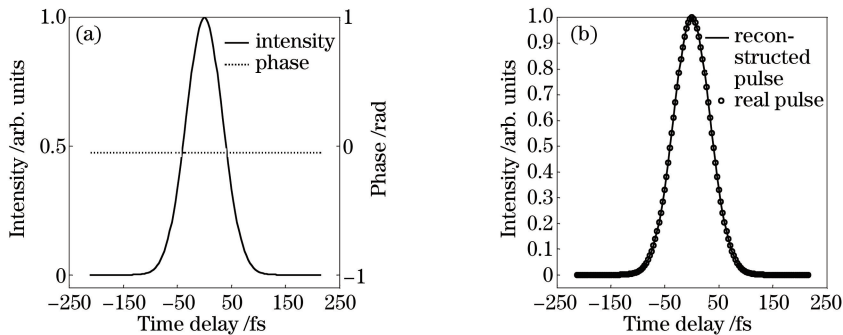


图 4 无噪声 FROG 迹线的重建脉冲。(a)重建脉冲强度和相位;(b)重建脉冲和真实脉冲的对比

Fig. 4 Reconstructed pulse of noiseless FROG trace. (a) Intensity and phase of reconstructed pulse; (b) comparison between reconstructed pulse and real pulse

定义  $\epsilon_{\text{RMS}}$  为重建脉冲强度与真实脉冲强度之间的误差,即

$$\epsilon_{\text{RMS}} = \left[ \sum_{i=1}^N (I - I')^2 / N \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $I$  为真实的脉冲强度值,  $I'$  为从 FROG 迹线中恢复出来的脉冲强度值,  $N$  为数据个数(取  $N=128$ )。

此时,重建均方误差  $\epsilon_{\text{RMS}}=3.26 \times 10^{-16}$ ,这说明重建脉冲强度与真实值吻合极好,同时更改猜测脉冲的形状、脉宽,对重建结果影响不大,表明所编写的脉冲重建程序是可行的。

#### 3.3 去噪方法的设计

实际 FROG 迹线中的噪声主要由 CCD 成像单元引起,通过分析 CCD 噪声的来源与种类,最终确定 FROG 迹线中存在的呈高斯分布的乘性噪声和呈泊松分布的加性噪声。大部分图像的去噪方法都有噪声针对性,低通滤波、去背景噪声、边缘抑制这三种方法比较适合 FROG 迹线的噪声处理。

FROG 迹线去噪方法的基本原理:首先选用低通滤波器滤除 FROG 迹线中的高频分量,将图像从空间

域变换到频域,通过改变截止频率的大小,控制滤波强度;其次,可以选取图像顶角的平均像素值,以此为背景值,再用整张图像像素值减去背景值,达到去背景噪声的目的;最后,考虑超高斯函数的平顶特点,令整个FROG迹线矩阵乘以相同规模的二维超高斯函数,调整合适的函数半峰全宽,理论上可以有效地抑制边缘噪声。基于MATLAB软件编写相应的去噪程序,并在下文的去噪过程中确定程序中参数的大小。

### 3.4 含模拟噪声的FROG迹线的脉冲重建

含乘性和加性噪声的FROG迹线矩阵在频率为 $\omega_i$ 、延时为 $\tau_i$ 处的强度值分别为

$$I_n^{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_i) = I^{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_i)(1 + m_{ij}\alpha), \quad (4)$$

$$I_n^{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_i) = I^{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_i) + \eta_{ij}(\alpha/n), \quad (5)$$

式中 $i, j$ 代表图3(d)对应的FROG矩阵中的 $\omega, \tau$ 的位置; $m_{ij}$ 为相同像素相同规模的一系列伪随机数,其平均值为0,并服从标准差为1的高斯分布; $\eta_{ij}$ 为均值为 $n$ 的伪随机数,服从泊松分布; $\alpha$ 为噪声的系数,通过设置 $\alpha$ 的值改变噪声大小。

以低通滤波、去背景噪声、边缘抑制的顺序依次对存在模拟噪声的理想FROG迹线进行去噪处理,如图5所示。根据(4)式和(5)式,加入噪声, $\alpha$ 取0.2,模拟噪声的FROG迹线和脉冲重建如图5(a)、(b)所示。在加入噪声后的FROG迹线背景中和中心亮斑边缘处均能明显看到噪声;由于噪声系数 $\alpha$ 较小,直接重建的脉冲强度轮廓比较清晰,但峰值处有明显变形,边缘的毛刺清晰可见,直接重建的重建误差为0.0325。重建脉冲的相位分布在脉冲中央附近相对平缓,但在边缘处有很大波动,说明基底噪声对脉冲相位有很大影响,但也可能是由衍射引起的相位起伏。

由图5(d)、(f)、(g)、(j)可见,随着FROG迹线中噪声的减少,重建脉冲的相位分布趋于一条直线,脉冲

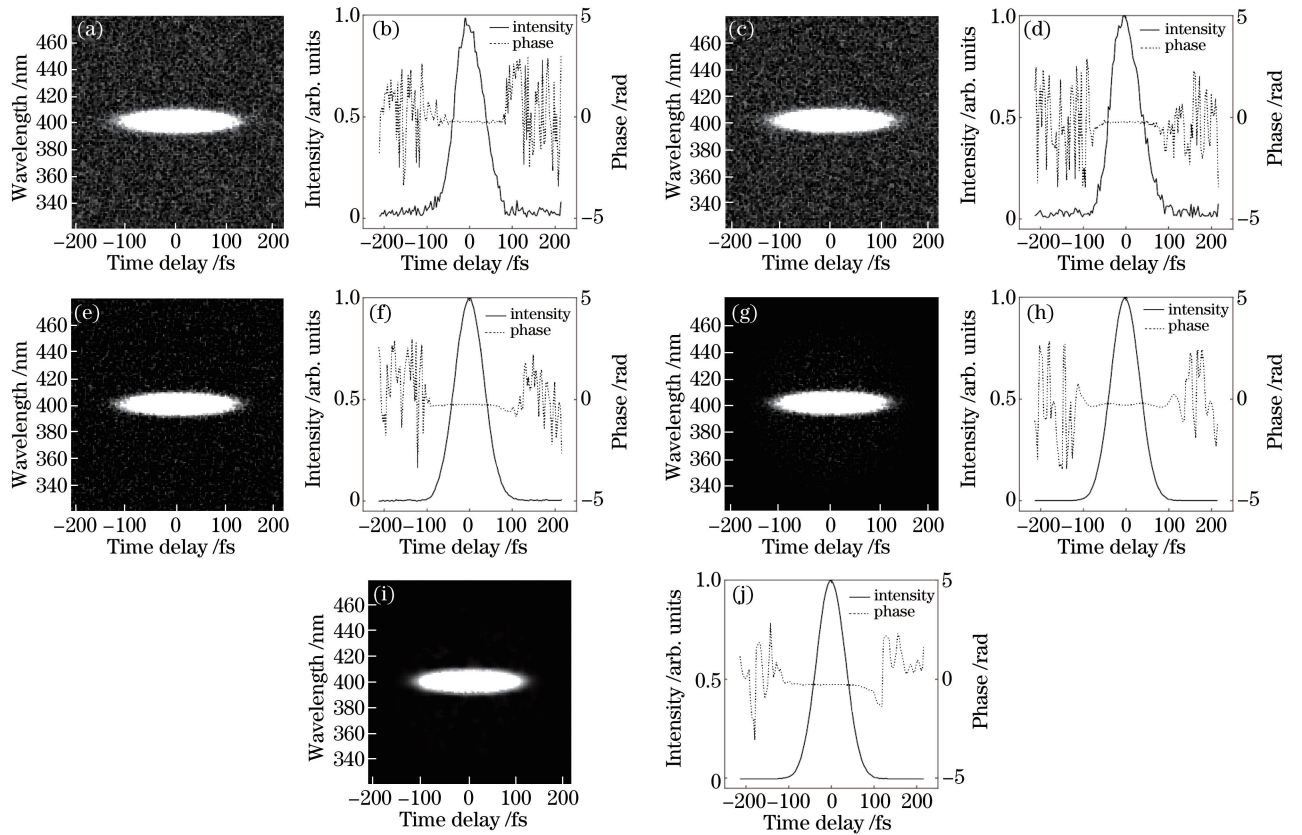


图5 模拟噪声的FROG迹线及脉冲重建。(a)模拟噪声;(b)直接重建;(c)(d)低通滤波后;(e)(f)低通滤波、去背景噪声后;(g)(h)低通滤波、去背景噪声、边缘抑制后;(i)(j)维纳滤波、低通滤波、去背景噪声、边缘抑制后

Fig. 5 FROG traces of analogue noise and reconstruction of pulse. (a) Analogue noise; (b) direct reconstruction; (c)(d) after low-pass filter; (e)(f) after low-pass filter and background-noise removing; (g)(h) after low-pass filter, background-noise removing and edge suppressing; (i)(j) after Wiener filter, low-pass filter, background-noise removing and edge suppressing

中间部分尤为明显,说明重建脉冲的相位与理论脉冲趋于一致;从重建脉冲的波形来看,从带毛刺的脉冲过渡到平滑的类高斯脉冲,体现了去噪程序的可行性。经过 4 步噪声处理以后,脉冲的重建误差为 0.0037,与直接重建的脉冲相比,重建误差降低了一个数量级,说明了该去噪程序的有效性。

### 3.5 实际 FROG 迹线的重建

在实验室中搭建 FROG 简化装置,为保证倍频的稳定性,激光器的抽运功率为 5 W,输出功率为 0.622 mW。实际测量的 FROG 迹线如图 6(a)所示,其中包含大量的衍射噪声。直接重建的结果如图 6(b)所示,可见直接重建的脉冲强度波形凌乱,相位无规则波动,重建效果很差。

使用去噪程序对图 6(a)所示的 FROG 迹线去除噪声并重建脉冲,其结果如图 6(c)、(d)所示。对比图 6(d)与图 5(b)发现,重建的脉冲波形平滑,且相位分布有一定的对称性。从脉冲的波形曲线可得,重建脉冲的宽度为 74 fs,该激光器出厂参数中脉冲宽度大约为 80 fs,两者相差不大。但激光器输出的超短脉冲与激光器的谐振腔、温度和湿度等环境参数有关,因此,超短脉冲激光器的出厂参数只能作为一个参考。实验中所用激光器为圆形镜腔激光器,其自再现模应具有轴对称性。由图 6(b)可得,其相位分布没有明显的对称性;而去除噪声后重建脉冲的相位显示了明显的对称性,如图 6(d)所示。说明去除噪声后再重建的脉冲更接近于真实的脉冲输出。

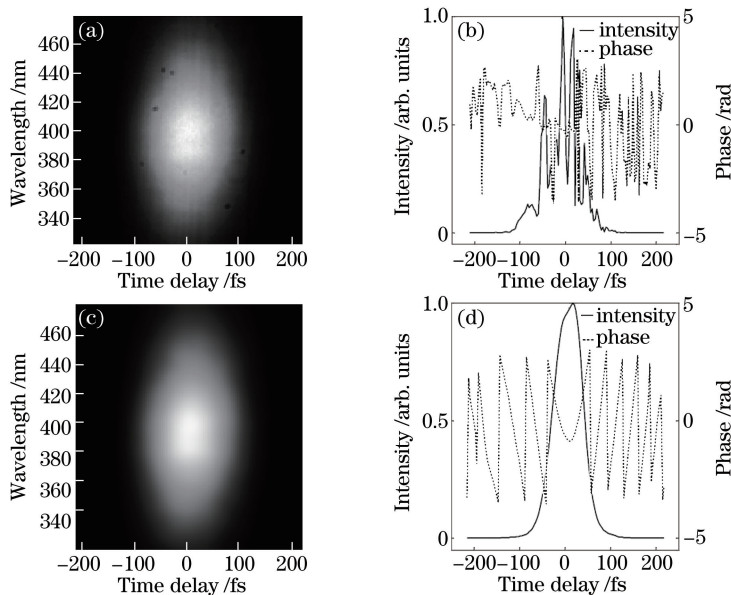


图 6 FROG 迹线的去噪及脉冲重建。(a)实验的;(b)直接重建;(c)(d)去噪后

Fig. 6 Noise removing of FROG trace and reconstruction of pulse. (a) Experimental;

(b) direct reconstruction; (c)(d) after noise removing

## 4 结 论

针对 FROG 迹线中存在的噪声,设计噪声处理方案,并验证了噪声处理方案的正确性。搭建了一种简化的 FROG 系统,测量了飞秒振荡器产生的超短脉冲的强度和相位,得到如下结论:

1) 利用 PCPGA 编写了脉冲重建程序,对数值模拟的理想 FROG 迹线进行重建,重建脉冲与理论脉冲的均方值误差为  $3.26 \times 10^{-16}$ ,验证了所编写的脉冲重建程序的正确性;

2) 根据 FROG 迹线中的噪声特点,编写了噪声去除程序,对理想 FROG 迹线添加模拟噪声,直接重建的均方值误差为 0.0325,去噪后再重建的均方值误差为 0.0037,两者相差一个数量级,说明噪声处理的有效性;

3) 对实验中实测的 FROG 迹线分别进行直接重建和去噪后再重建,发现直接重建的脉冲相位凌乱,去噪后重建的脉冲相位具有对称性,符合谐振腔中产生的自再现模式的特征,说明去噪后重建的脉冲更接近于真实的脉冲,验证了噪声处理的必要性。

## 参 考 文 献

- [1] Sivilis M, Duwe M, Abel B, *et al.* Extreme-ultraviolet light generation in plasmonic nanostructures[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(5): 304-309.
- [2] Petek H. Single-molecule femtochemistry: Molecular imaging at the space-time limit[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(1): 5-13.
- [3] Robles F E, Samineni P, Wilson J W, *et al.* Pump-probe nonlinear phase dispersion spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9353-9364.
- [4] Allegre O, Jin Y, Perrie W, *et al.* Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21198-21207.
- [5] Rick T. Frequency-resolved optical grating: The measurement of ultrashort laser pulses[M]. New York: Springer, 2000: 417-427.
- [6] Varillas R B, Candeo A, de Silvestri S, *et al.* Generation and characterization of tunable  $\mu\text{J}$ -level, 10 fs UV pulses[C]. *International Conference on Ultrafast Phenomena*, 2014, 2(8): 2.
- [7] Lev U, Graham L, Bruner B D, *et al.* Quantum control of photodissociation using shaped ultrafast pulses[C]. *High Intensity Lasers and High Field Phenomena*, 2012: HW4C. 6.
- [8] Zhou P, Schulz H, Kohns P. Atomic spectroscopy with ultrashort laser pulses using frequency-resolved optical gating [J]. *Optics Communications*, 1996, 123(4): 501-504.
- [9] Trebino R, DeLong K W, Fittinghoff D N, *et al.* Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(9): 3277-3295.
- [10] Shea P O, Kimmel M, Gu X, *et al.* Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(12): 932-934.
- [11] Heisler I A, Correia R R B, Cunha S L S. Characterization of ultrashort pulses by a modified grating-eliminated non-nonsense observation of ultrafast incident laser light  $E$  fields (GRENOUILLE) method[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(16): 3377-3382.
- [12] Kane D J, Trebino R. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(10): 823-825.
- [13] Okamura A, Sakakibara Y, Omoda E, *et al.* Experimental analysis of coherent supercontinuum generation and ultrashort pulse generation using cross-correlation frequency resolved optical gating (X-FROG) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(3): 400-406.
- [14] Cohen J, Bowlan P, Chauhan V, *et al.* Measuring extremely complex pulses with time-bandwidth products exceeding 65000 using multiple-delay crossed-beam spectral interferometry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24451-24460.
- [15] Wong T C, Ratner J, Trebino R. Simultaneous measurement of two different-color ultrashort pulses on a single shot [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(8): 1889-1893.
- [16] Mairesse Y, Gobert O, Breger P, *et al.* High harmonic XUV spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(17): 173903.
- [17] Ventalon C, Fraser J M, Joffe M. Time-domain interferometry for direct electric field reconstruction of mid-infrared femtosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(19): 1826-1828.
- [18] Li L M, Kusaka S, Karasawa N, *et al.* Amplitude and phase characterization of 5.0 fs optical pulses using spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(7): 684-687.