

基于迈克耳孙干涉仪的共线自相关超短光脉冲测量

何伟^{1*}, 崔明焕¹, 宋迪迪¹, 秦朝朝¹, 江玉海²

¹河南师范大学物理与材料科学学院, 河南 新乡 453000;

²中国科学院上海高等研究院, 上海 201210

摘要 基于迈克耳孙干涉仪的原理, 采用共线自相关的测量方法, 同时对强度自相关和二维电场自相关进行测量。对强度自相关的测量数据进行高斯拟合, 得到所测脉冲时域内光强的半峰全宽约为 96.2 fs; 由 CMOS 图像传感芯片所测得的二维电场自相关中干涉条纹的分布情况, 可以得到脉冲光斑波前相位的倾斜信息; 通过对干涉条纹随时间延迟变化的漂移以及持续时间, 采用傅里叶级数拟合分析手段, 在延迟位移平台精度限制内, 得到脉冲光功率谱存在微弱的 1090 nm 成分。

关键词 超快光学; 飞秒脉冲; 强度自相关; 迈克耳孙干涉仪; 电场自相关

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1204001

Collinear Autocorrelation Measurement of Ultrashort Laser Pulse Based on Michelson Interferometer

He Wei^{1*}, Cui Minghuan¹, Song Didi¹, Qin Chaochao¹, Jiang Yuhai²

¹College of Physics and Material Science, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453000, China;

²Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

Abstract The collinear autocorrelation measurement method is adopted based on the principle of Michelson interferometer, in which the intensity autocorrelation and the two-dimensional electric field autocorrelation are simultaneously measured. A Gaussian function is used to fit the intensity autocorrelation data and the full width at half maximum of the measured laser pulse in time domain is about 96.2 fs. From the interference fringe distribution of two-dimensional electric field autocorrelation obtained by the CMOS imaging sensor, the tilt information of pulsed light spot wavefront phase can be obtained. Moreover, the Fourier series analysis tool is adopted to fit the interference fringes shifting with time delay. Within the restriction of delay stage accuracy, a weak component at 1090 nm is disclosed in the pulsed laser power spectrum.

Key words ultrafast optics; femtosecond pulse; intensity autocorrelation; Michelson interferometer; electric field autocorrelation

OCIS codes 320.7160; 120.3180; 320.5550; 120.1880

1 引言

迈克耳孙干涉仪利用简单的分束镜, 通过分振幅的方法产生双光束并分析双光束之间的干涉特性, 从而实现对精密结构或微小位移的测量^[1-2]。近几年, 引力波探测方面的热点研究也是基于迈克耳孙干涉仪的测量原理^[3]。同时, 随着超短脉冲激光

技术的发展, 飞秒激光的应用对脉冲光时域、频域以及光斑波前等特性的表征提出了更高的要求。由于超短飞秒光脉冲的时间宽度小至飞秒量级, 任何光电探测器以及示波器都已经无法再对飞秒脉冲光直接进行探测表征, 于是人们利用脉冲本身的特性进行采样, 通过测量脉冲光自相关函数的方式来获知脉冲光的相关信息^[4-7]。超短光脉冲自相关的测量

收稿日期: 2018-06-08; 修回日期: 2018-07-11; 录用日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(11420101003, 91636105)、国家自然科学基金理论物理专项(11747058)、河南省重点研发与推广专项(182102210371)

* E-mail: wxh173@foxmail.com

是基于迈克耳孙干涉原理进行的,有共线以及非共线的探测方式。非共线自相关探测避免了背景噪声^[8],而共线自相关探测存在背景噪声,但可以兼容电场自相关测量,电场自相关的测量方法可用来揭示脉冲光斑波前形变以及功率谱信息。

Bor 等^[9]采用迈克耳孙干涉仪的共线电场自相关测量方法对飞秒脉冲光经望远镜系统后所产生的脉冲光斑波前畸变进行了测量,可观察到由望远镜系统引起的波前畸变所带来的环状干涉条纹;Ameer-Beg 等^[10]在迈克耳孙干涉仪基础上,对经望远镜系统后的波前畸变脉冲与未发生波前形变的参考臂脉冲光进行共线自相关测量,从而还原波前畸变脉冲的光斑波前延迟情况;Grasbon 等^[11]利用改进型 Mach-Zehnder 干涉仪对飞秒脉冲光的波前倾斜进行翻转控制,进而研究不同波前倾斜下的共线自相关测量结果。从文献[11]可知,飞秒脉冲光斑波前的形变影响脉冲光的共线自相关测量结果,所以有必要对飞秒脉冲光的脉宽以及波前信息同时进行表征。由傅里叶变换红外光谱的测量原理可知,根据脉冲光电场自相关的测量结果还可以分析脉冲光的红外频谱成分。基于迈克耳孙干涉仪原理,本文采用共线方式对二次谐波强度自相关以及二维电场自相关进行探测,以实现同时对飞秒脉冲光时域宽度和脉冲光斑波前信息进行简易表征,并且通过傅里叶变换分析二维电场自相关的测量结果,得到脉冲光的功率谱信息,进而较为全面地掌握超短光脉冲的基本特征信息,为超短光脉冲在精密测量或光与物质的相互作用等方面的应用做好铺垫。

2 基本原理

共线自相关测量实验装置如图 1 所示。基于迈克耳孙干涉仪的分振幅双光束的原理,水平线偏振光作为入射脉冲光,经光阑 A1 后,通过 5:5 的分束镜 BS1 分成反射至固定臂反射镜 M1 的反射光束,以及透射至可移动臂的反射镜 M2 的透射光束;其中反射光束的光斑大小可用光阑 A2 微调,透射光束中反射镜 M2 安装至精度为 1 μ m 级的位移平台上,且位移平台的移动方向平行于透射光的传播方向。通过调整位移平台的移动距离,可实现对两束脉冲光的时间延迟调节,即将空间距离的变化转换成了时间延迟量。经分束镜 BS1 合束后的两脉冲光之间存在一个随位移平台变化的时间延迟 τ 。合束后的两脉冲光经透镜 L1 聚焦至非线性倍频晶体偏硼酸钡 β -BBO 表面。由于干涉仪出射并入射至非

线性晶体上的双脉冲光场可表示为

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2} \text{Re}\{a(t) \exp(j\omega_0 t) + a(t - \tau) \exp[j\omega_0(t - \tau)]\}, \quad (1)$$

式中 t 为时间, ω_0 为脉冲光振荡频率(基频), $a(t)$ 为脉冲光场的振幅包络函数。系数 1/2 为考虑 5:5 分束镜的反射和透射所引起的电场振幅变化。经过非线性倍频晶体后,产生的二次谐波光电场 $E_{\text{SHG}}(t)$ 与输入场 $E_{\text{out}}(t)$ 的平方成正比,可描述为^[8]

$$E_{\text{SHG}}(t) \approx E_{\text{out}}^2(t) = \text{Re}\{\exp(2j\omega_0 t)[a^2(t) + a^2(t - \tau) \exp(-2j\omega_0 \tau) + 2a(t)a(t - \tau) \exp(-j\omega_0 \tau)]\}, \quad (2)$$

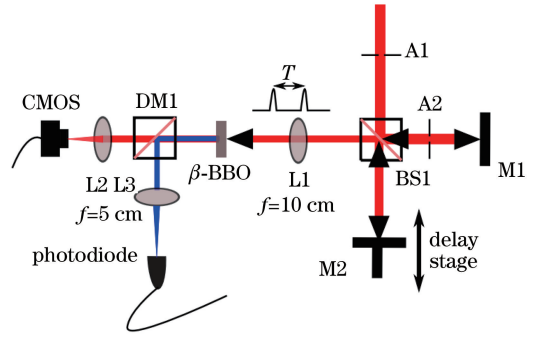


图 1 基于迈克耳孙干涉仪的强度自相关和二维电场自相关测量原理示意图

Fig. 1 Measurement principle of intensity autocorrelation and two-dimensional electric field autocorrelation based on Michelson interferometer

经过非线性晶体 β -BBO 后,除了产生的二次谐波光场之外,还有入射到非线性晶体上但未完全转换为二次谐波光场的剩余原始双脉冲光场,在图 1 中分别用蓝线和红线表示。透过 β -BBO 晶体的原始双脉冲光场,在相位上将产生相同的变化,而且由于所采用的 β -BBO 晶体非常薄,厚度约为 50 μ m,对双脉冲产生的群色散延迟基本可以忽略。采用二向色镜 DM1 将产生的以(2)式所描述的二次谐波光场以及未转换为二次谐波的由(1)式描述的原始双脉冲光场进行分光处理。二向色镜 DM1 以 430 nm 波长为限,反射小于此值的光波,透射大于此值的光波。透过非线性晶体的原始双脉冲光场的波长均为飞秒激光脉冲的初始波长(800 nm);经非线性晶体转换为二次谐波光场的频率为基频光的二倍频,波长即为 400 nm。于是,二次谐波光场(图 1 中蓝线)经二向色镜 DM1 反射后,经透镜聚焦在光电二极管探测器上,然后通过强度自相关测量得到脉冲宽度信息;未发生转换的原始双脉冲光场(图 1 中红线)则直接透过二向色镜 DM1 聚焦在 CMOS

传感芯片表面,从二维电场自相关测量结果分析中获知脉冲光斑波前倾斜以及功率谱的信息。

3 实验结果与讨论

3.1 强度自相关

采用光电二极管进行强度自相关测量,实际测量的是二次谐波光场功率对时间的积分,可等效为时间平均光场功率,由(2)式的二次谐波电场可得二次谐波光场功率时间积分为^[8]

$$\begin{aligned} \langle P_{\text{SHG}}(t) \rangle \approx & 2\langle |a(t)|^4 \rangle + 4\langle |a(t)|^2 |a(t-\tau)|^2 \rangle + \\ & \{2\langle (|a(t)|^2 + |a(t-\tau)|^2) \times \\ & a(t)a^*(t-\tau) \rangle \exp(j\omega_0\tau) + \\ & \langle [a(t)a^*(t-\tau)]^2 \rangle \exp(2j\omega_0\tau)\}. \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知:所测量的强度自相关信号是与待测脉冲相关的4项之和;第1项不依赖两脉冲之间的时间延迟 τ ,是与两脉冲能量相关的常数项;第2项随 τ 相对缓慢的变化,是待测脉冲的强度自相关项;第3项为强度加权的基频光脉冲之间的干涉项;第4项为倍频光干涉项,且第3、4项在一个光学周期内随着 τ 的变化快速振荡。测量经过几个光学周期所得二次谐波信号的平均值,用于抑制第3、4干涉项^[8]。于是,测量所得到的时间平均二次谐波功率信号为^[8,12]

$$\langle P_{\text{SHG}}(t) \rangle \approx \langle |a(t)|^4 \rangle \left(1 + \frac{2\langle |a(t)|^2 |a(t-\tau)|^2 \rangle}{\langle |a(t)|^4 \rangle} \right). \quad (4)$$

定义归一化强度自相关函数为

$$G_2(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t-\tau) \rangle}{\langle |I(t)|^2 \rangle}, \quad (5)$$

式中 $I(t) \approx |a(t)|^2$,即脉冲光强。于是,测量所得的时间平均二次谐波功率为

$$\langle P_{\text{SHG}}(t) \rangle \approx 1 + 2G_2(\tau). \quad (6)$$

由(6)式可知,共线的二次谐波功率等于一个恒定的背景噪声项加一个强度自相关函数的两倍项,背景噪声是由每个脉冲光单独产生的二次谐波光场引起的,而由强度自相关项中相关峰的宽度可获知脉冲时间宽度的相关信息。图2所示为飞秒脉冲强度自相关测量数据,黑色圆圈点为对飞秒激光脉冲的强度进行自相关测量的结果,红色曲线为高斯函数拟合合曲线。由高斯拟合曲线可知,自相关峰的半峰全宽 $\Delta\tau \approx 136$ fs,若假设飞秒激光输出脉冲的波形为高斯形脉冲^[12-13],通过高斯形脉冲所对应的反

卷积因子 $\sqrt{2}$,可得到脉冲光强度时域半峰全宽 $\Delta t = \Delta\tau/\sqrt{2} \approx 96.2$ fs。由共线强度自相关测量原理可知,脉宽测量精度决定于干涉仪中移动臂的位移平台精度,而位移平台精度为 $1 \mu\text{m}$,所以理论上脉宽测量的精度为 6.67 fs,基本能满足目前超短脉冲光的测量需求。同时,由于位移平台的最大行程为 25 mm,因此飞秒脉冲光时域宽度的最大表征范围约为 166.7 ps。采用功率计测量入射光脉冲的功率,发现此共线强度自相关测量所需的最小入射光脉冲的平均功率约为 $3 \mu\text{W}$ 。

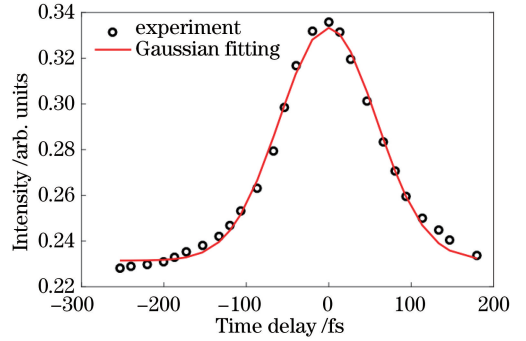


图2 飞秒脉冲强度自相关测量数据

Fig. 2 Intensity autocorrelation measurement data of femtosecond pulse

3.2 二维电场自相关

在忽略薄非线性晶体以及二向色镜所引起的群延迟色散效应后,经非线性晶体未转换为二次谐波光场的透射原始基频双脉冲光场的电场表达式可由(1)式描述。基频双脉冲光场透过二向色镜后,直接聚焦至CMOS感光芯片,然后进行二维电场自相关测量。图3为不同时间延迟下移动臂延迟脉冲光与固定臂脉冲光的二维电场自相关测量结果,左上角为在 -153 fs时间延迟下即在两脉冲之间不会出现时域重叠的情况下所得到的图像,其中大直径圆光斑为测量中移动臂的延迟脉冲光斑,小直径圆光斑为固定臂的脉冲光斑。由于共线的两脉冲之间在时域上没有重叠,两脉冲的合束光斑只是各个脉冲光斑强度的简单线性叠加,并没有干涉现象的出现。并且,通过去除非线性晶体以及二向色镜,使得CMOS直接探测原始基频双脉冲光斑,获得的光束质量以及光斑半径都保持不变。同时,观察到延迟脉冲光斑和固定臂脉冲光斑都呈现出圆孔夫琅禾费衍射的圆环图样。

随着时间延迟 τ 从 -153 fs到 180 fs的变化,从CMOS图像传感芯片得到两个基频脉冲合束光斑的重叠区域逐渐出现稍微倾斜的平行干涉条纹;

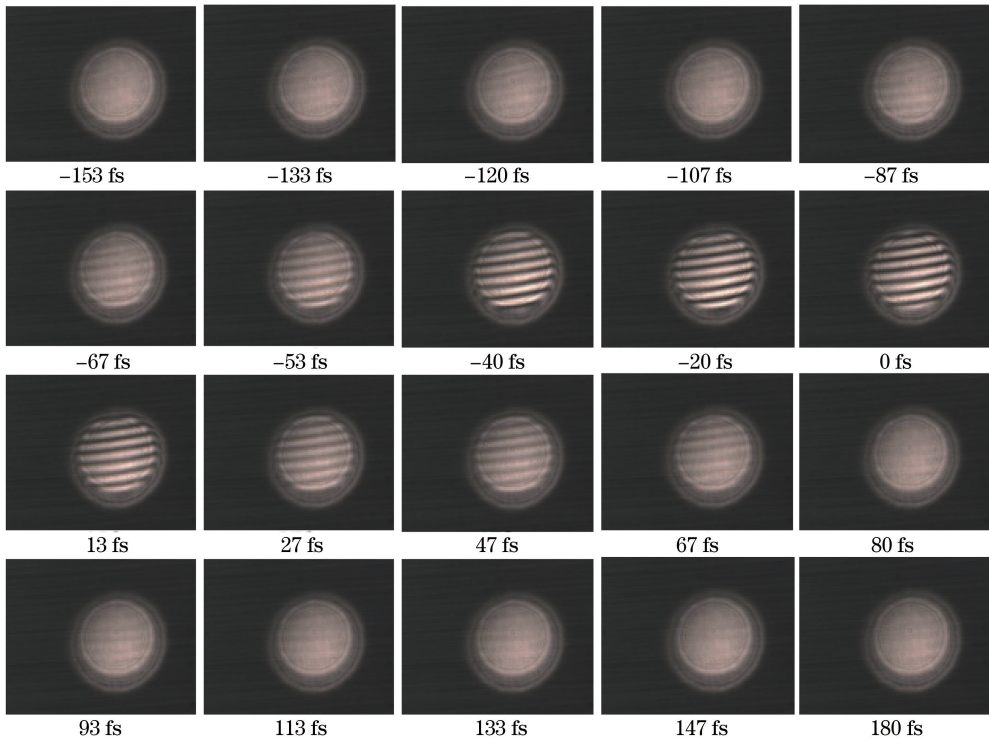


图 3 不同时间延迟下移动臂延迟脉冲光与固定臂脉冲光的二维电场自相关测量

Fig. 3 Two-dimensional electric field autocorrelation measurement results for arm-movable delay pulse and arm-fixed pulse under different time delays

当时间延迟 τ 越趋近零点时,干涉条纹逐渐加强且愈加明显,并且干涉条纹随着时间延迟 τ 的变化而出现漂移,远离时间延迟零点时干涉条纹逐渐消失。这种近乎平行的干涉条纹与迈克耳孙干涉实验中圆环状的干涉条纹有较大区别,其原因在于:1)实验中基于迈克耳孙干涉仪的自相关测量没有采用补偿板对分束镜所引入的额外光程差进行补偿;2)所表征的人射脉冲激光光斑可能存在波前倾斜,导致波前相位延迟,于是产生具有对称性且倾斜的平行干涉条纹^[9]。干涉条纹中的明条纹位置表明该位置处两脉冲光的光程差为波长的整数倍,暗条纹的位置处两脉冲光的光程差为半波长的奇数倍。同时,延迟臂脉冲光的光程变化引起 CMOS 感光芯片上倾斜波前不同位置处光程差的漂移,进而表现出干涉条纹的漂移。

超短脉冲光的脉冲相干时间较短,导致干涉条纹漂移过程所持续的时间也很短,而频谱宽度近似为脉冲相干时间的倒数。根据二维电场自相关测量中干涉条纹的漂移以及持续时间,采用傅里叶变换红外光谱的测量原理,通过傅里叶级数分析手段,对二维电场相关测量结果中干涉图像区域内某像素点强度值随时间延迟的变化曲线进行拟合,得到脉冲

光频谱信息^[14-15]。图 4(a)为时间延迟零点时的干涉条纹图像,选取像素坐标点(790,550)为基点,提取各个时间延迟下相同坐标位置处的强度值,得到图 4(b)中圆点所示的强度值随时间延迟的变化曲线。对曲线进行傅里叶级数拟合分析,结果与测量数据点几乎完全重合。根据傅里叶级数的拟合结果,脉冲光光谱存在微弱的 1090 nm 波长附近的光谱成分,这可能来自于脉冲光频谱的尾带信号或是经过非线性晶体时产生的微弱杂散光频谱信号。受延迟臂位移精度的限制,采样点之间的时间延迟步长较长(约位 3.3636 fs),能够解析最短波长为 1000 nm 处的信息,所以并不能从电场自相关强度值随时间延迟的变化中得到基频脉冲光 800 nm 波长处的主信号。但二维电场自相关的测量仍可提供脉冲光斑的波前相位倾斜情况,且以目前的测量精度可对经过光学参量振荡变换后的红外脉冲光进行功率谱分析。

4 结 论

基于迈克耳孙干涉原理,结合强度自相关和二维电场自相关的共线测量手段,基本实现了对超短光脉冲的时域半峰全宽、功率谱以及脉冲光斑波前

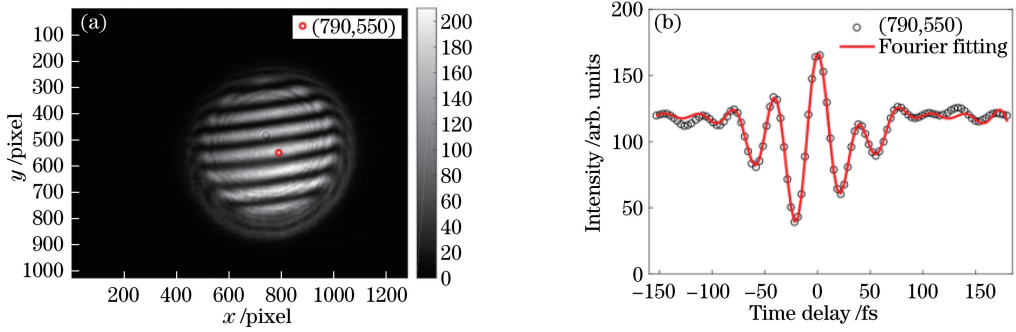


图 4 脉冲光谱测量。(a)在时间延迟零点时二维电场自相关图像和坐标点(790,550)的位置；
(b)不同时间延迟下(790,550)坐标点处的强度变化及傅里叶级数拟合曲线

Fig. 4 Spectral measurement of pulsed laser. (a) Two-dimensional autocorrelation image at zero time delay and coordinate position (790, 550); (b) intensity variance at coordinate position (790, 550) and Fourier function fitting curve

相位倾斜的简易分析和表征。通过对飞秒激光经过非线性晶体产生的二次谐波强度自相关测量以及对相关峰的高斯函数拟合,得出脉冲光强度在时域的半峰全宽约为 96.2 fs;同时,对基频双脉冲的二维电场进行自相关检测,由双脉冲合束光斑的平行干涉条纹倾斜分布特点,可推得基频脉冲光斑存在波前相位倾斜;最后,对所采集的双脉冲干涉条纹图像中心像素点的强度值随时间延迟的变化数据进行傅里叶级数拟合分析,但受延迟臂位移平台的精度限制,只获悉脉冲光谱中含有微弱的 1090 nm 波长成分,但该精度可适用于对基频脉冲光经光学参量振荡变换后所产生的红外光脉冲的功率谱分析。

参 考 文 献

[1] Hariharan P. Basics of interferometry[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2007: 211-213.
 [2] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. 7th ed. UK: Cambridge University Press, 1999.
 [3] McKenzie K, Shaddock D A, McClelland D E, *et al.* Experimental demonstration of a squeezing-enhanced power-recycled Michelson interferometer for gravitational wave detection[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(23): 231102.
 [4] Liu T F, She W L, Qiu Z R, *et al.* Calibration method for the measurement of ultrashort-pulsed lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(1): 111-114.
 刘天夫, 余卫龙, 丘志仁, 等. 超短脉冲激光测量的标定方法[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 111-114.
 [5] Ouyang X P, Zhang F L, Zhang P Z, *et al.* Second order autocorrelation applied to femtosecond laser [J]. Chinese Journal of 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.
 [6] Bao W X, Zhang N, Kong M Q, *et al.* Measurement of ultrashort pulse laser with scanning third order correlation technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708009.
 包文霞, 张楠, 孔梦清, 等. 利用扫描式三阶相关技术测量超短脉冲激光的特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708009.
 [7] Liu W J, Gao R X, Sun Z H, *et al.* Michelson interference applied to measure ultrashort pulse[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(1): 60-63.
 刘文军, 高仁喜, 孙正和, 等. 迈克尔逊干涉在超短脉冲测量中的应用[J]. 大学物理实验, 2017, 30(1): 60-63.
 [8] Weiner A M. Ultrafast optics[M]. Hoboken: Wiley, 2008.
 [9] Bor Z, Gogolak Z, Szabo G. Femtosecond-resolution pulse-front distortion measurement by time-of-flight interferometry[J]. Optics Letters, 1989, 14(16): 862-864.
 [10] Ameer-Beg S, Langley A J, Ross I N, *et al.* An achromatic lens for focusing femtosecond pulses: Direct measurement of femtosecond pulse front distortion using a second-order autocorrelation technique[J]. Optics Communications, 1996, 122(4/5/6): 99-104.
 [11] Grasbon F, Dreischuh A, Paulus G G, *et al.* Femtosecond interferometric autocorrelations in the presence of pulse front distortions[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3571: 164-169.
 [12] Ippen E P, Shank C V. Techniques for measurement [J]. Ultrashort Light Pulses. Berlin: Springer, 1984: 83-122.
 [13] Diels J C, Fontaine J J, McMichael I C, *et al.*

- Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(9): 1270-1282.
- [14] Reynaud F, Salin F, Barthelemy A. Measurement of phase shifts introduced by nonlinear optical phenomena on subpicosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(5): 275-277.
- [15] Lepetit L, Chériaux G, Joffre M. Linear techniques of phase measurement by femtosecond spectral interferometry for applications in spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(12): 2467-2474.