

# 全反式超短脉冲测量系统的光学设计

程广真<sup>1</sup>, 张留洋<sup>1\*</sup>, 浦绍质<sup>1</sup>, 曲玉秋<sup>2</sup>, 李倩茹<sup>1</sup>, 于泽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学应用科学学院, 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** 由于超短脉冲测量系统中存在透射元件, 脉冲经过测量系统时将被展宽, 因此测量结果中存在较大的误差。针对脉冲测量中被展宽的问题, 设计了一种全反式超短脉冲测量系统, 可实现对更短的超短脉冲的测量。所设计的系统利用菲涅耳双面镜产生时间延迟, 利用柱面反射镜、薄晶体和光栅产生光谱, 避免了系统中色散的产生。在满足采样率的前提下, 对频率分辨光学开关(FROG)迹线采样范围进行分析, 获得测量系统所需的时间延迟和倍频带宽, 并以此作为约束条件, 推导了待测脉冲的脉冲宽度与菲涅耳双面镜和柱面反射镜参数的关系。

**关键词** 光学设计; 超短脉冲测量; 频率分辨光学开关系统; 采样率

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.152201

## Optical Design of Total-Reflective Ultra-Short-Pulse Measurement System

Cheng Guangzhen<sup>1</sup>, Zhang Liuyang<sup>1\*</sup>, Pu Shaozhi<sup>1</sup>, Qu Yuqiu<sup>2</sup>, Li Qianru<sup>1</sup>, Yu Ze<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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** While passing through an ultra-short-pulse measurement system, the pulse will be broadened owing to the presence of transmission elements. The broadening of the pulse results in significant errors in the final measurement results. To address this problem, a total-reflective ultra-short-pulse measurement system is designed to realize the measurement of shorter ultra-short pulse. In this system, Fresnel bi-mirror is used to generate time delays and a cylindrical mirror, thin crystals, and gratings are used to generate spectra, preventing the generation of dispersion in the system. Under the premise of satisfying the sampling rate requirement, the sampling range of the frequency-resolved optical gating trace is analyzed to obtain the required time delay and frequency-doubling bandwidth. With this constraint, the relationship between the width of the pulse to be measured and parameters of Fresnel bi-mirror and cylindrical mirror is deduced herein.

**Key words** optical design; ultra-short-pulse measurement; frequency-resolved optical gating system; sampling rate

**OCIS codes** 220.4830; 320.7090; 320.7100

## 1 引言

超短脉冲自产生至今, 脉冲宽度越来越窄, 峰值功率越来越高, 应用场景更加广泛<sup>[1-2]</sup>, 推动了激光科学、原子分子物理、非线性科学、微结构材料科学、超快信息光子学、生物医学光子学等一批基础与前沿交叉学科的开拓和发展<sup>[3-5]</sup>。超短脉冲的应用除了与其“快”和“强”的特性有关以外, 还与其时空分

布有重大关联, 因此在一些应用中需要精确测量脉冲的时空分布, 主要体现在以下方面: 1) 通过对当前产生脉冲中啁啾和相位畸变信息的测量, 获得更短的超短脉冲; 2) 在一些新的材料表征技术中, 通过对输入和输出脉冲的准确测量, 获得更多的材料信息; 3) 通过对脉冲的精确测量, 在实际应用中对脉冲进行整形。为此, 亟需研发便利、准确的超短脉冲测量系统。超短脉冲测量的常用方法有两类: 频率分辨

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2016023)

\* E-mail: johnien@163.com

光学开关(FROG)法<sup>[6-8]</sup>和光谱相位相干电场重建(SPIDER)法<sup>[9-11]</sup>,其中FROG技术由Trebino等提出,可以得到脉冲宽度<sup>[12]</sup>、时间波形<sup>[13]</sup>、相位<sup>[14]</sup>和光谱啁啾<sup>[15]</sup>等脉冲信息。FROG和SPIDER这两类装置,能够较好地测量超短脉冲的时间特性,但光路的调谐困难、结构复杂,仅适于实验室使用。FROG的简化装置GRENOUILLE(Grating-Eliminated No-nonsense Observation of Ultrafast Incident Laser Light E-fields)系统(以下简称G系统)<sup>[16]</sup>克服了FROG装置昂贵及光路不易调节的缺点,但由于使用透射元件,不可避免地引入了色散而使脉冲展宽,不能用于测量更短的超短脉冲。Akturk等<sup>[17]</sup>利用柱面反射镜取代了柱面透镜,实现了对19 fs脉冲的测量。本文针对现阶段飞秒脉冲测量装置中因透射元件引入的色散而使得脉冲发生展宽的问题,研究以反射元件等价替代透射元件的途径,搭建全反式G系统,可大大减少系统引入的色散,提高脉冲测量装置的测量能力。

## 2 全反式超短脉冲测量系统的设计

G系统是一种简化后的FROG系统,其测量原理和FROG相同,在光路设计上,以菲涅耳双棱镜代替延迟线,以厚晶体代替了光谱仪,使光路简单并易于调节,两者的对比如图1所示<sup>[18]</sup>,时间延迟在水平方向( $x$ 轴)、光谱信息在竖直方向( $y$ 轴)上体现,利用CCD采集两脉冲相干产生的FROG迹线,利用解调程序对FROG迹线解调即可获得待测脉冲的波形和相位。

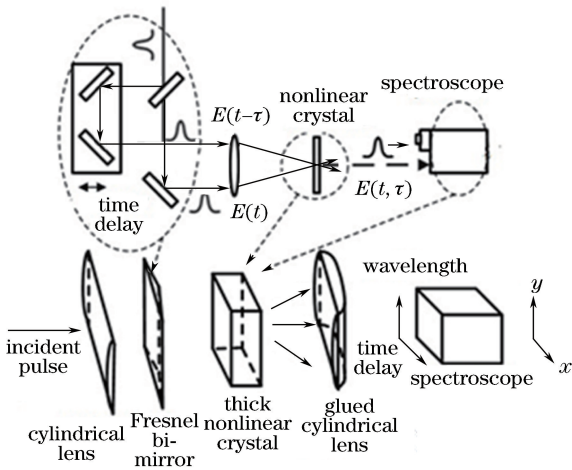


图1 透射G系统结构图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Structure of transmissive G system<sup>[18]</sup>

本文设计的全反式超短脉冲测量系统如图2所示,使用菲涅耳双面镜取代菲涅耳双棱镜引入时间延迟,用柱面反射镜替代柱面透镜对入射脉冲聚焦,

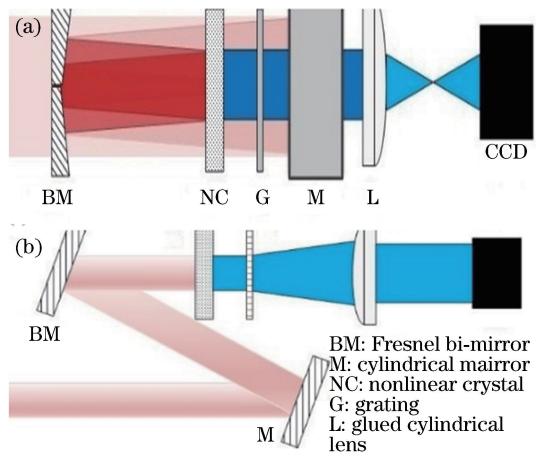


图2 全反式超短脉冲测量系统的光路结构。

(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 2 Optical path structure of total-reflective ultra-short-pulse measurement system. (a) Top view; (b) side view  
达到了系统所需的倍频带宽,以薄的偏硼酸钡(BBO)晶体和光栅取代厚BBO晶体产生光谱。这样,整个系统中无色散元件,避免了脉冲展宽,提高了测量精度。

## 3 元件参数计算

在全反式超短脉冲测量系统的设计中主要考虑两方面因素,即测量脉冲所需的时间延迟和光谱带宽,两者应分别大于测量系统所提供的时间延迟和带宽。测量脉冲所需的时间延迟和带宽由FROG采样率(FSR)决定<sup>[19]</sup>。对于测量系统来说:在水平方向上,菲涅耳双面镜提供了时间延迟,时延的大小与菲涅耳双面镜的顶角成反比;在竖直方向上,带宽由聚焦透镜决定,焦距越小,带宽越大。因此,在计算元件参数之前,首先通过对FROG迹线采样进行分析,确定系统所需引入的时间延迟范围( $\Delta T$ )和带宽( $\Delta \Omega$ ),并以此为约束条件计算菲涅耳双面镜参数和柱面反射镜参数。同时,为了尽可能减少倍频晶体引入的色散,使用薄晶体和光栅取代原有的厚晶体。

### 3.1 FROG迹线的采样宽度

当脉冲通过测量系统后,产生包含不同时延和光谱的FROG迹线。在数字图像处理中,采样率和采样宽度是重要的参数,关系到信息是否丢失。根据FROG的采样率要求,迹线至少应包含迹线中心强度 $10^{-4}$ 以内的范围,此时可以认为迹线包含了脉冲的所有相位和强度信息。

以变换极限的高斯脉冲为例,计算测量装置的

时延和光谱范围。

入射脉冲可表示为

$$E(t) = \exp[-t^2/(2T^2)], \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $T$  为脉冲时间周期。脉冲宽度  $\Delta\tau = 2\sqrt{\ln 2} T$ 。其产生的理想 FROG 迹线为

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

式中:  $G(\cdot)$  为延时脉冲;  $\omega$  为脉冲信号的角频率;  $\tau$  为脉冲延迟。

根据(2)式和 FSR 的要求, 测量脉冲所需的频域带宽和时间延迟满足

$$I_{\text{FROG}}\left(\frac{\Delta\Omega}{2}, 0\right) = 10^{-4} I_{\text{FROG}}(0, 0), \quad (3)$$

$$I_{\text{FROG}}\left(0, \frac{\Delta T}{2}\right) = 10^{-4} I_{\text{FROG}}(0, 0). \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式可得, 测量脉冲所需的频域宽度和时间延迟范围为

$$\Delta\Omega = 8.58 \frac{1}{T} = \frac{14.3}{\Delta\tau}, \quad (5)$$

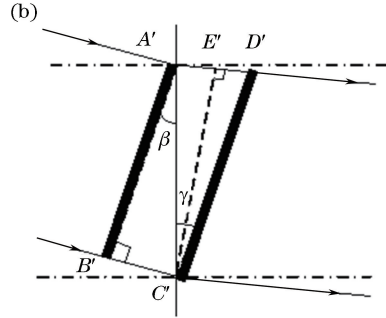
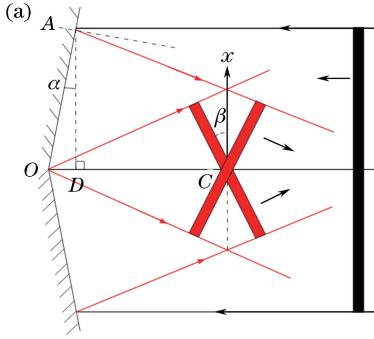


图3 脉冲传输光路图。(a) 双面镜脉冲; (b) 晶体表面脉冲

Fig. 3 Optical path diagrams of pulse transmission. (a) Pulse from Fresnel bi-mirror; (b) pulse on crystal surface

当脉冲进入晶体后, 其波前发生倾斜, 因此波前与  $x$  方向的夹角发生变化, 如图 3(b) 所示, 图中实线代表脉冲波前, 虚线代表等相面,  $\overline{A'C'}$  代表晶体表面, 此时的波前倾斜角  $\gamma$  为

$$\gamma \approx \arctan \frac{\overline{A'D'}}{\overline{E'C'}} \approx \frac{\overline{A'D'}}{\overline{E'C'}}, \quad (8)$$

式中:  $\frac{\overline{B'C'}}{c} = \frac{\overline{A'E'}}{v_2} = \frac{\overline{A'D'}}{v_{g2}}$ ;  $v_2$  和  $v_{g2}$  分别为脉冲在

BBO 晶体中的相速度和群速度;  $\overline{B'C'} = \overline{A'C'} \cdot$

$$\sin \beta; \overline{E'C'} = \sqrt{\overline{A'C'}^2 - \overline{A'E'}^2}.$$

代入(8)式可得:

$$\Delta T = 8.58 T = 5.15 \Delta\tau. \quad (6)$$

### 3.2 菲涅耳双面镜参数

不同时延的脉冲叠加信息体现在测量系统的水平方向上, 时间延迟由菲涅耳双面镜的夹角和光束宽度决定, 如图 3(a) 所示。超短脉冲经过菲涅耳双面镜后, 被分为对称交叉的两束光, 由于不存在色散, 因此在传输过程中, 脉冲波前与等相位面重合, 并与光的传播方向垂直。在  $C$  点处放置晶体, 能够获得最大的时间延迟范围。进入晶体后, 由于群速度与相速度不同, 脉冲波前倾斜, 波前与等相面偏离, 如图 3(b) 所示, 波前倾斜角的变化将引起时间延迟的改变。

设光束宽度为  $2d$ , 双面镜底角为  $\alpha$ , 以  $C$  点为坐标原点建立坐标系, 竖直方向上的坐标为  $x$ 。由图 3(a) 中的几何关系可知, 对称交叉脉冲间的时间延迟  $\delta\tau$  可表示为

$$\delta\tau = \frac{2x \tan \beta}{c} = \frac{2x \tan(2\alpha)}{c} \approx \frac{4\alpha x}{c}, \quad (7)$$

式中:  $c$  为真空中的光速;  $\beta = 2\alpha$ 。由(7)式可知, 菲涅耳双面镜引入的时间延迟与双面镜的底角和光束宽度成正比。

$$\gamma = \frac{v_{g2}}{c} \frac{\sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \left[\frac{v_2}{c} \sin(2\alpha)\right]^2}}. \quad (9)$$

当  $\alpha$  较小时, (9) 式分母部分近似为 1, 则  $\gamma \approx \frac{2v_{g2} \cdot \alpha}{c}$ 。

在 BBO 晶体中的时间延迟为

$$\delta\tau' = \frac{2x \tan \gamma}{v_{g2}} \approx \frac{4\alpha x}{c}. \quad (10)$$

根据(7)、(10)式可知: 当菲涅耳双面镜底角较小时, 脉冲的波前倾斜不明显, 此时的时间延迟与无色散时的时间延迟相同; 但当底角较大时, 波前倾斜不能忽略, 必须用(9)式所描述的波前倾斜角计算时

间延迟。

(6)式给出了由采样定律所决定的时间延迟范围  $\Delta T$ ,  $\Delta T$  为脉冲测量需要满足的最小时间延迟, 其与测量系统能够提供的时间延迟  $\delta\tau'$  的关系为  $\delta\tau' \geq \Delta T$ , 由此可得测量系统中菲涅耳双面镜底角应满足的条件为

$$\alpha \geq \frac{5.15\Delta\tau c}{4d}. \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 菲涅耳双面镜底角决定了适合测量系统测量的脉冲宽度范围。图 4 所示为不同光束宽度下, 双面镜底角与待测脉冲时间宽度的关系。

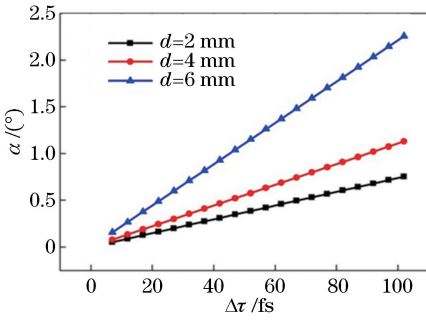


图 4 双面镜底角与待测脉冲时间宽度的关系

Fig. 4 Relationship between bottom angle of Fresnel bi-mirror and time width of pulse to be tested

根据图 3(a)中的几何关系, BBO 晶体到菲涅耳双面镜位置的距离可表示为

$$\overline{OC} = \frac{1}{2}(\overline{OD} + \overline{DB}) = \frac{1}{2}d \left( \tan \alpha + \frac{1}{\tan 2\alpha} \right). \quad (12)$$

BBO 晶体到菲涅耳双面镜的位置距离  $L$  关系如图 5 所示。

由图 5 可知, 双面镜的底角越大, 则晶体距离双面镜越近。为了方便晶体的放置, 其与双面镜的距离应大于 20 mm, 这决定了  $\alpha$  的最大值, 而(11)式

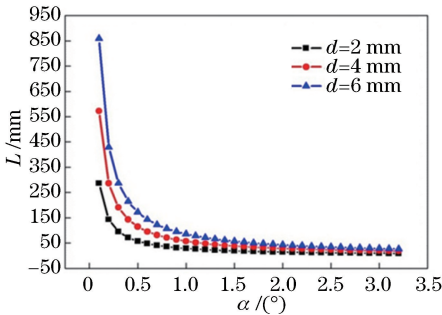


图 5 晶体位置与双面镜底角的关系

Fig. 5 Relationship between crystal position and bottom angle of Fresnel bi-mirror

给出了  $\alpha$  的最小值, 即(11)式和(12)式共同定义了  $\alpha$  的取值范围。

### 3.3 柱面反射镜参数

竖直方向的光路决定了系统的光谱分辨率。在竖直方向上, 柱面反射镜将入射脉冲在竖直方向上会聚于 BBO 晶体上(图 6), 使得入射脉冲的各频率成分以不同角度入射。要在 BBO 中满足相位匹配条件, 需要选择合适的透镜焦距, 以保证系统的光谱带宽满足(5)式。

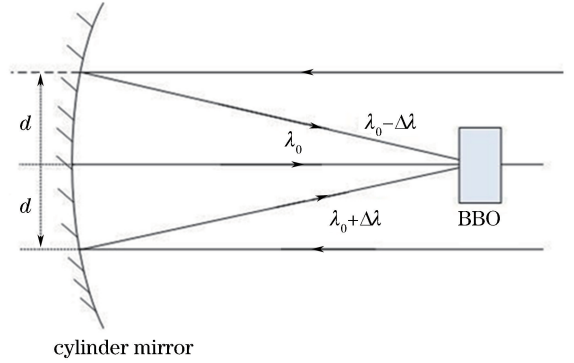


图 6 脉冲经过柱面反射镜的光路图

Fig. 6 Optical path of pulse passing through cylindrical mirror

被柱面镜聚焦后, 各波长入射到 BBO 晶体的匹配方向与中心波长匹配方向的夹角  $\phi$  满足

$$\phi(\lambda) = \arcsin \{ n_{10} \sin [\theta_p(\lambda) - \theta_{p0}] \}, \quad (13)$$

式中:  $n_{10}$  为中心波长在 BBO 中的折射率;  $\theta_p(\lambda)$  为不同波长在 BBO 晶体中的相位匹配;  $\theta_{p0}$  为中心波长的相位匹配角;  $\phi$  在这里称为最佳入射角。

从图 6 可以看出, 倍频带宽与柱面反射镜焦距的关系为

$$F(\Delta\lambda) = \frac{d}{\tan [\phi(\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2)]}. \quad (14)$$

结合(5)式, 测量系统的带宽  $\Delta\omega$  应满足  $|\Delta\omega| = \frac{2\pi c}{\lambda_0^2} |\Delta\lambda| \geq \Delta\Omega$ , 即要求  $|\Delta\lambda| \geq \frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \Delta\Omega$ , 则(14)式可以表示为

$$F(\Delta\tau) \leq \frac{d}{\tan \left[ \phi \left( \lambda_0 \pm \frac{14.3\lambda_0^2}{4\pi c \Delta\tau} \right) \right]}. \quad (15)$$

图 7 所示为中心波长 800 nm、不同光束宽度下, 测量不同宽度脉冲所需的最大曲面镜焦距, 其与光束宽度和脉冲宽度成正比。

## 4 结 论

设计了全反式 G 系统的设计光路, 通过对

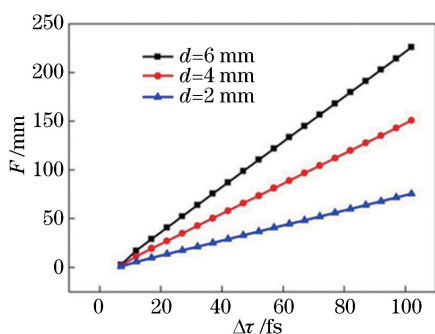


图7 柱面反射镜焦距与可测量的最小脉冲宽度的关系

Fig. 7 Relationship between focal length of cylindrical mirror and time width of pulse to be tested

FROG 迹线采样率的分析,结合脉冲在柱面反射镜和菲涅耳双面镜的传播行迹的详细理论推导,得到了菲涅耳双面镜底角与时间延迟、非线性晶体距离的关系,以及柱面反射镜与倍频带宽的关系。通过全反式 G 系统的设计,选择菲涅耳双面镜、柱面反射镜、薄晶体和光栅作为测量系统的主要光学元件,可大大减少由玻璃元件引起的脉冲色散而诱发的脉冲展宽,提高超短脉冲测量装置的测量能力。

### 参 考 文 献

- [1] Li S L, Ye Y K. Development of femtosecond laser direct writing waveguides in transparent optical materials[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 783-787.  
李士玲, 叶永凯. 飞秒激光直写透明光学材料光波导的研究进展[J]. *激光技术*, 2012, 36(6): 783-787.
- [2] Ma J, Zhu Y, Yang K M. Metal ion reduction induced by femtolaser two-photon absorption [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 395-397.  
马竞, 朱煜, 杨开明. 应用飞秒激光双光子吸收还原金属离子[J]. *激光技术*, 2010, 34(3): 395-397.
- [3] Sheng Z M, Zhang J. Schemes for electron acceleration by laser-driven plasma waves [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(s1): 153-155.  
盛政明, 张杰. 超短强激光脉冲驱动等离子体波加速电子方案[J]. *高能物理与核物理*, 2006, 30(s1): 153-155.
- [4] Bumaliya A, Zhang B. Generation of VUV ultrashort pulses and their applications in ultrafast dynamics [J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2016, 33(2): 293-299.  
布玛丽亚·阿布力米提, 张冰. VUV 超短脉冲的产生及其在超快动力学中的应用[J]. *原子与分子物理学报*, 2016, 33(2): 293-299.

- [5] Liu H. Particle acceleration through the resonance of high magnetic field and high frequency electromagnetic wave and the application in the laboratory astrophysical physics [D]. Beijing: Chinese Academy of Engineering Physics, 2004.  
刘红. 带电粒子在强激光和强磁场中的共振加速机制及其在实验天体物理中的应用 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2004.
- [6] Nabekawa Y, Furukawa Y, Okino T, *et al.* Frequency-resolved optical gating technique for retrieving the amplitude of a vibrational wavepacket [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11366.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 792-794.
- [10] Gallmann L, Sutter D H, Matuschek N, *et al.* Characterization of sub-6-fs optical pulses with spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(18): 1314-1316.
- [11] Gallet V, Pariente G, Kahaly S, *et al.* Spatio-temporal characterization techniques of high-power femtosecond laser chains [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8972: 89720S.
- [12] Yu H. Study on measurement of femtosecond laser pulse width [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 679-681.  
于洪. 飞秒激光脉冲宽度测量研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(5): 679-681.
- [13] Zhao S L, Zhu B Q, Zhan T Y, *et al.* Research on pulse shape properties of high-power Nd: glass laser frequency tripling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4170-4175.  
赵书林, 朱宝强, 詹庭宇, 等. 高功率钕玻璃激光三倍频脉冲时间波形的研究 [J]. *物理学报*, 2006, 55(8): 4170-4175.

- [14] Wang P, Wang Z H, Wei Z Y, *et al.* Measurement of spectral phase of femtosecond laser pulse using SPIDER technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(9): 3004-3009.  
王鹏, 王兆华, 魏志义, 等. 用 SPIDER 法测量飞秒激光脉冲的光谱相位[J]. *物理学报*, 2004, 53(9): 3004-3009.
- [15] Hong W Y. "Inverted-image" frequency chirp induced by self-phase modulation in highly noninstantaneous medium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(2): 024214.  
洪伟毅. 强时间非局域系统中自相位调制诱导的“脉冲镜像”啁啾[J]. *物理学报*, 2015, 64(2): 024214.
- [16] O'Shea P, Kimmel M, Gu X, *et al.* Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(12): 932-934.
- [17] Akturk S, Kimmel M, O'Shea P, *et al.* Extremely simple device for measuring 20-fs pulses[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(9): 1025-1027.
- [18] O'Shea P, Kimmel M, Gu X, *et al.* Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(12): 932-934.
- [19] DeLong K W, Fittinghoff D N, Trebino R. Practical issues in ultrashort-laser-pulse measurement using frequency-resolved optical gating[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(7): 1253-1264.