

文章编号: 1002-2082 (2020) 04-0690-07

单脉冲飞秒激光时域参数测量技术研究

吴磊¹, 张彪¹, 俞兵^{1,2}, 袁良^{1,2}, 陈超¹, 薛媛元¹, 董再天¹, 杨鸿儒¹, 黎高平¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 钛宝石飞秒激光放大系统具有重复频率低、脉冲波形复杂等特点, 为准确测量其峰值功率, 提出对单次脉冲波形和脉冲宽度测量的需求。介绍了单脉冲飞秒激光时域波形和脉冲宽度的测量原理和测量方法, 设计了基于频率分辨光学开关法的单脉冲飞秒激光时域参数测量装置。讨论了单脉冲飞秒激光时域参数测量校准面临的问题及解决方法。

关键词: 飞秒激光; 脉冲宽度; 脉冲波形; 单次脉冲测量

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0407001

Research on time domain parameters measurement of single pulse femtosecond laser

WU Lei¹, ZHANG Biao¹, YU Bing^{1,2}, YUAN Liang^{1,2}, CHEN Chao¹,
XUE Yuanyuan¹, DONG Zaitian¹, YANG Hongru¹, LI Gaoping¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. School of Optics and Photonics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The Ti sapphire femtosecond laser amplification system has the characteristics of low repetition frequency and complex pulse waveform. In order to accurately measure the peak power of the femtosecond laser amplification system, the measurement demand of single pulse waveform and pulse width was proposed. The measurement principle and method of single pulse femtosecond laser time domain waveform and pulse width were introduced, the time domain parameters measuring device of single pulse femtosecond laser based on frequency-resolved optical gating method was designed, and the technical problems and solutions in the calibration of time domain parameters measurement of single pulse femtosecond laser were discussed.

Key words: femtosecond laser; pulse width; pulse waveform; single pulse measurement

引言

钛宝石飞秒激光放大系统具有极高的峰值功率, 在高能量密度物理、等离子、太赫兹及阿秒激光等研究领域具有非常重要的应用前景^[1-8]。在钛宝石飞秒激光放大系统研制过程中, 涉及脉冲波形、脉冲宽度等时域参数的测量和校准问题, 由于钛宝石飞秒激光放大系统具有重复频率低、脉冲波形复杂等特点, 为准确测量其峰值功率, 必须进行单次时域脉冲波形和脉冲宽度测量^[9-13]。

目前国内外主要采用光谱相位相干直接电场重构法 (SPIDER)、频率分辨光学开关法 (FROG)

等方法测量单脉冲飞秒激光脉冲波形和脉冲宽度等参数^[14-23]。光谱相位相干直接电场重构法波长响应范围和脉宽测量范围不但依赖于非线性晶体厚度和相位匹配参数, 还需进行色散及光谱分光, 故结构复杂, 对待测飞秒激光光束质量要求较高。频率分辨光学开关法 (FROG) 是在强度自相关的基础上发展起来的飞秒激光脉冲波形和脉冲宽度测量方法, 尽管脉宽测量范围依赖于非线性晶体厚度和相位匹配参数, 但相对于 SPIDER, 只需更换少量光学元件 (如倍频晶体等), 可满足不同脉宽、不同波长范围的测量需求。

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 技术基础科研项目 (JSJL2019208C001)

作者简介: 吴磊 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光参数计量技术研究。E-mail: runnymede@sohu.com

1 单脉冲飞秒激光脉冲波形和脉冲宽度测量原理

频率分辨光学开关法根据光开关函数类型,可分为二次谐波光开关法、偏振光开关法、自衍射光开关法、三次谐波光开关法等,其中最成熟的是二次谐波光开关法。采用二次谐波频率分辨光学开关法(SHG-FROG)测量单脉冲飞秒激光脉冲波形分布曲线。二次谐波频率分辨光学开关法通过二

倍频非线性晶体获得待测飞秒激光脉冲的强度自相关信号,利用光谱仪对自相关信号进行频率和时间分辨,采集自相关信号随频率和延迟时间变化的 FROG 迹线,通过迭代算法获得飞秒激光脉冲相对光谱功率分布和相位分布,根据相对光谱功率分布和相位分布反演时域脉冲波形,从而实现脉冲宽度的测量^[14-17]。

单脉冲 SHG-FROG 测量原理图如图 1 所示。

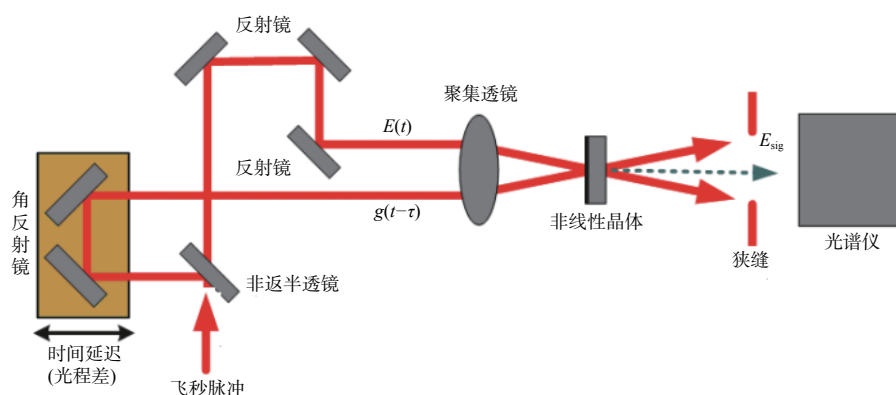


图 1 单脉冲 SHG-FROG 测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single pulse SHG-FROG measurement

飞秒激光脉冲经分束镜(半反半透镜)后分为探测光脉冲 $E(t)$ 和光开关脉冲 $g(t-\tau)$,其中 τ 为探测光脉冲与光开关脉冲之间的时间延迟量,这 2 束光脉冲汇聚到非线性晶体产生倍频光信号,即强度自相关信号^[14-17]:

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

式中: E_{sig} 为强度自相关信号; $E(t)$ 和 $g(t-\tau)$ 分别为探测光脉冲和光开关脉冲, τ 为时间延迟量。

信号光脉冲和光开关脉冲以一定夹角入射到倍频晶体上,2 束光波前在空间不同位置处具有不同的时间延迟量,如图 2 所示。

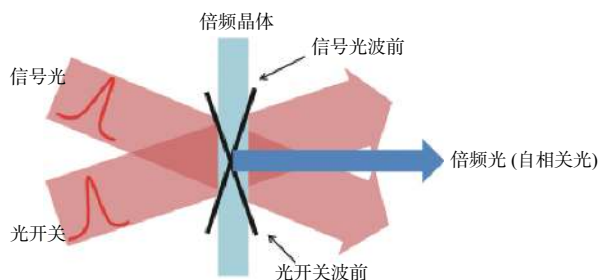


图 2 单脉冲 SHG-FROG 信号光与光开关延迟示意图

Fig. 2 Schematic diagram of delay time for single pulse SHG-FROG signal light and optical gating

利用面阵光谱仪对强度自相关信号进行频率和时间分辨,获得时间-频率域正交的二维谱图 $I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$,即强度自相关信号随延时 τ 和频率 ω 变化的二维 FROG 谱图(FROG 迹线),见图 3 所示。

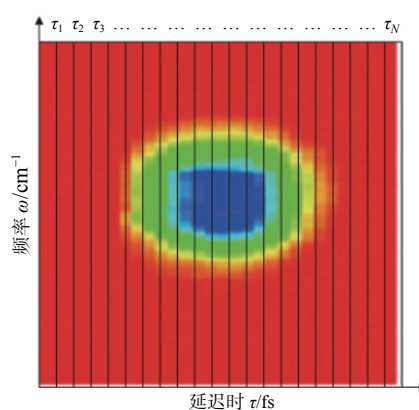


图 3 单脉冲 SHG-FROG 图谱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single pulse SHG-FROG traces

频域二维谱图场强分布为

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

根据傅里叶变换公式,时域自相关信号 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 可表示为

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{sig}}(t, \Omega) \exp(-i\Omega\tau) d\Omega \quad (3)$$

式中, Ω 为延迟时间 τ 的傅里叶变换量。

即二维谱图(FROG迹线) $I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$ 可表示为

$$I_{\text{FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{sig}}(t, \Omega) \exp(-i\omega t - i\Omega\tau) d\Omega \right|^2 \quad (4)$$

根据已知(测量)的 $I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$, 求解电场矢量 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 的过程属于二维相位恢复问题, 可通过脉冲波形反演算法获得信号光(自相关光信号)电场矢量 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 及入射激光电场矢量 $E(t)$ 和相位, 进而得到脉冲波形分布曲线。

频域光强(相对光谱功率)分布及其相位的关系为

$$\tilde{E}(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp[-i\phi(\omega)] \quad (5)$$

$$S(\omega) = |\tilde{E}(\omega)|^2 \quad (6)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan[\text{Im}[\tilde{E}(\omega)]/\text{Re}[\tilde{E}(\omega)]] \quad (7)$$

式中: $\tilde{E}(\omega)$ 为频域电场矢量; $S(\omega)$ 为频域相对光谱功率分布; $\phi(\omega)$ 为频域相位分布, ω 为频率。

时域光强及其相位的关系为

$$|E(t)| = \text{Re}[\sqrt{I(t)} \exp[-i\phi(t)]] \quad (8)$$

$$I(t) = |\tilde{E}(t)|^2 \quad (9)$$

$$\phi(t) = -\arctan[\text{Im}[\tilde{E}(t)]/\text{Re}[\tilde{E}(t)]] \quad (10)$$

式中: $E(t)$ 为时域电场矢量; $I(t)$ 为时域脉冲波形分布; $\phi(t)$ 为时域相位分布。

2 单脉冲飞秒激光脉冲波形和脉冲宽度测量方法及测量装置

2.1 单脉冲飞秒激光脉冲波形和脉冲宽度测量方法

研制由激光缩束单元、脉冲能量测量单元、FROG脉冲波形测量单元、同步触发单元和数据采集处理单元等组成的单脉冲飞秒激光时域参数测量装置, 实现单脉冲飞秒强激光脉冲波形和脉冲宽度测量, 系统组成图如图4所示。

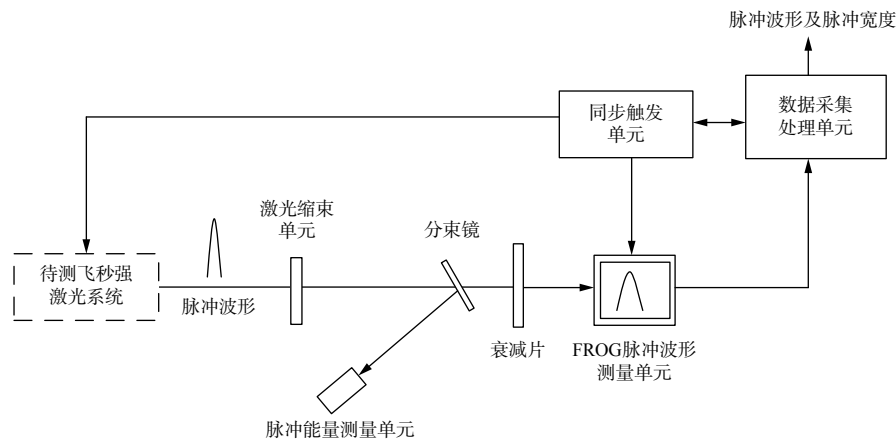


图4 单脉冲飞秒激光时域参数测量装置组成图

Fig. 4 Composition block diagram of time domain parameters measuring device for single pulse femtosecond laser

待测飞秒强激光脉冲经激光缩束单元后入射到分束镜上, 分为两束光脉冲, 其中一束光脉冲(透射光)进入脉冲能量测量单元, 用于测量飞秒激光脉冲能量; 另一束光(反射光)进入 FROG 脉冲波形和脉冲宽度测量单元, 用于获取强度自相关信号随延迟时间 τ 和频率 ω 变化的二维 FROG 迹线 $I_{\text{FROG}}(\omega, \tau)$ 。经计算机处理单元进行数据采集、处理后获得待测飞秒激光脉冲的相对光谱功率分布(相对光强分布)、相位分布, 进行脉冲波形重构后得到脉冲宽度测量值。同步触发单元用于待测飞秒激光器、脉冲能量测量单元和脉冲波形测量

单元的同步控制。

飞秒激光相对光强分布 $I(t)$ 正比于入射激光脉冲能量 Q , 定义波形面积积分为

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) dt \quad (11)$$

可得时域脉冲波形分布函数 $P(t)$:

$$P(t) = I(t)Q/S \quad (12)$$

对时域脉冲波形分布函数 $P(t)$ 进行脉冲波形曲线拟合, 得到脉冲宽度测量值。

2.2 单脉冲飞秒激光时域参数测量装置

1) 激光缩束及衰减单元

钛宝石飞秒强激光系统(钛宝石飞秒放大器)

波长约 800 nm, 光斑直径为几 mm 至几十 mm, 脉冲能量为 mJ 至 J 量级。利用离轴反射式激光缩束单元将大口径飞秒激光光束直径缩小至 FROG 脉冲波形测量单元接收口径范围内。

2) 分束镜

分束镜采用熔融石英宽带低色散平板分束镜。熔融石英与 N-BK7 等飞秒分束镜材料相比,具有高均匀性和低热膨胀系数,在二次谐波波段不产生激光诱导荧光等效应,是可见至近红外波段的最佳飞秒分束镜材料。熔融石英分束镜反射光进入激光能量测量单元,其透射光进入脉冲波形和脉冲宽度测量单元。

3) 脉冲能量测量单元

对缩束后的激光脉冲采用口径为 50 mm×50 mm 的热释电能量计进行脉冲能量测量。热释电能量计探头硬件方案如图 5 所示。主要由入射口、衰减片、热释电传感器、数据输入/输出接口及外壳等构成。

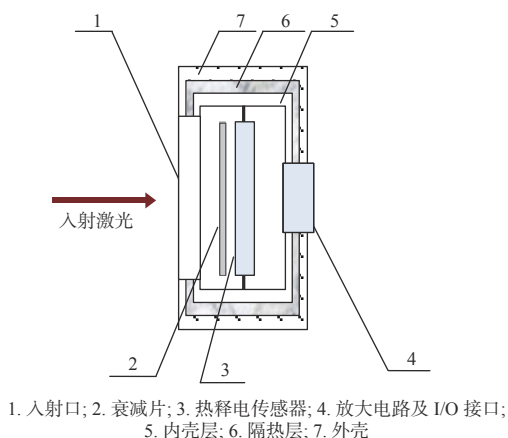


图5 热释电激光能量计探头硬件组成图

Fig. 5 Composition block diagram of pyroelectric laser energy meter probe hardware

热释电能量计主要指标为波长范围 $0.7\text{ }\mu\text{m}\sim 1.1\text{ }\mu\text{m}$, 接收口径 $\Phi 50\text{ mm}$, 脉冲能量测量范围 $0.2\text{ mJ}\sim 40\text{ J}$, 脉冲能量测量不确定度 $U_{\text{rel}}=4\%(k=2)$ 。

4) 脉冲波形测量单元

FROG 脉冲波形和脉冲宽度测量单元由相位延迟单元(含分束器、角反射镜、电动纳米位移平台等)、倍频单元(含凹面聚焦镜、倍频晶体等)、光电探测单元等构成,用于获取待测飞秒激光脉冲的 FROG 脉冲波形信号(FROG 迹线)。FROG 脉冲波形测量单元组成如图 6 所示。

a) 相位延迟单元

相位延迟单元由分束器、角反射镜、电动纳米位移平台等组成。待测飞秒脉冲激光被分束器分成 2 束脉冲激光,经角反射镜 1 和 2 反射后,由聚焦镜会聚到倍频晶体上。电动纳米位移平台(步进精度优于 150 ns)用于调节 2 束脉冲光之间的等光程点。

b) 倍频单元

倍频单元由聚焦镜(消球差低色散凹面镜)、非线性晶体(倍频晶体)、空间滤波器等构成。进入倍频单元的2束脉冲激光经聚焦透镜聚焦于倍频晶体产生二次谐波脉冲,经过倍频晶体剩余的基频脉冲激光被空间滤波器过滤。高信噪比的二次谐波脉冲信号送入光谱仪模块。倍频晶体选用BBO晶体,可实现相位匹配的波段范围为409.6 nm~3 500 nm,相位匹配输出波长189 nm~1 750 nm,不易潮解,能长期稳定工作。倍频晶体尺寸为5 mm×5 mm,厚度为50 μm~100 μm。滤波器采用吸收型带通滤光片,通光范围为250 nm~550 nm,透过率≥85%,截止区截止深度为0.01%。

c) 光谱仪

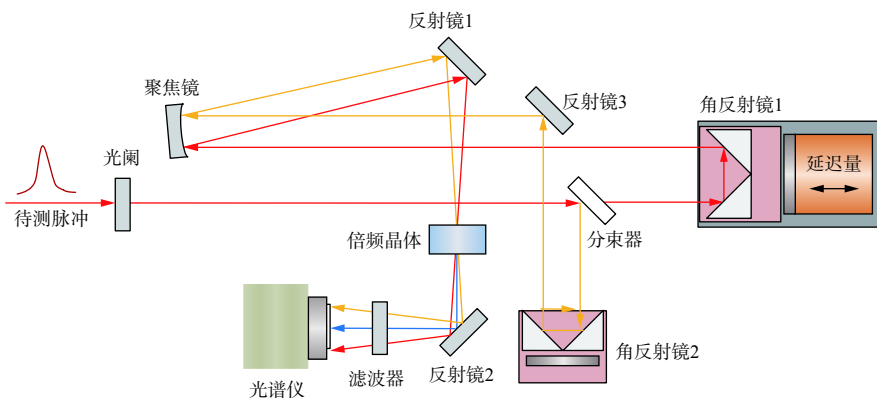


图 6 FROG 脉冲波形测量单元组成图

Fig. 6 Composition block diagram of FROG pulse waveform measurement unit

光谱仪用于对强度自相关信号进行频率和时间分辨,采集自相关信号随频率和延迟时间变化的 FROG 迹线。光谱仪采用微型光纤光谱仪,波长范围为 0.2 nm~1 100 nm,像素为 2 048×128,光谱分辨率优于 0.9 nm。

5) 同步延迟单元

同步延迟触发单元用于 FROG 脉冲波形测量单元与待测飞秒强激光同步,触发电平为 5 V,延迟范围为 0.1 μs~10 s,延迟精度优于 1.5 ns,步进

调节精度为 5 ps,抖动为 60 ps。

6) 数据采集处理单元

数据采集处理单元工作原理图如图 7 所示。数据采集处理单元主要用于控制、采集和处理 FROG 脉冲波形和脉冲宽度测量单元输出的自相关光谱信号(FROG 迹线)。通过迭代算法获得飞秒激光脉冲相对光谱功率分布和相位分布,根据相对光谱功率分布和相位分布反演时域脉冲波形,从而实现脉冲波形和脉冲宽度的测量。

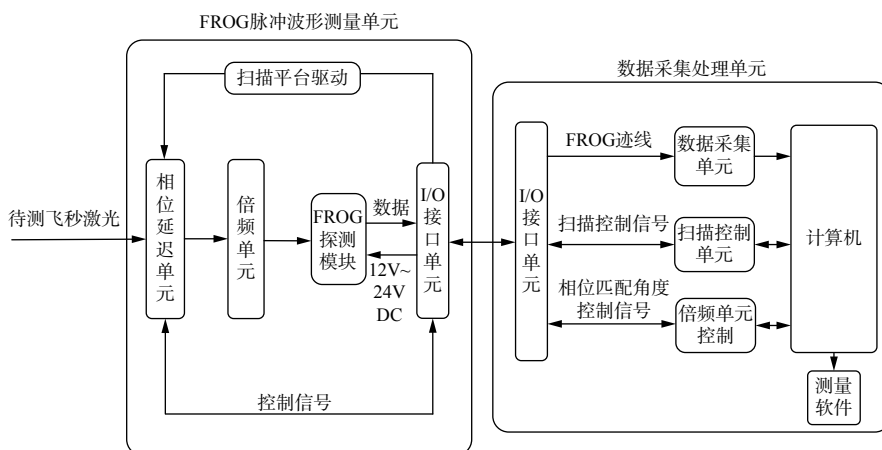


图 7 数据采集处理单元工作原理图

Fig. 7 Schematic diagram of data acquisition and processing unit

3 单脉冲飞秒激光时域参数测量校准存在的问题及解决措施

1) 色散补偿方法

对 20 fs 以下飞秒激光脉冲,光学元件色散等引起的脉冲展宽是影响脉冲波形时间分辨率测量的重要因素。通过研究光学元件、倍频晶体等色散特性,采用啁啾镜补偿、数学模型补偿等多种手段降低或补偿装置色散量,提高脉冲波形测量分辨率。

2) 标定方法

单脉冲飞秒激光时域参数测量装置主要涉及光电探测器光谱响应度、延迟时间、相对光谱功率分布等标定,其中最重要的是延迟时间标定。与扫描 FROG 方案不同,单脉冲 FROG 延迟时间不能直接通过测量线性扫描平台的位移量进行测量。微小改变信号光和开关光的延迟量时,2 束光的等光程点位置会发生平移,FROG 迹线也会沿时间延迟方向发生线性平移,可利用微动延迟线引起 FROG 迹线平移的方法进行延迟时间标定。

3) 溯源方法

单脉冲飞秒激光时域参数测量装置(单脉冲 FROG)可通过与单脉冲光谱相位相干直接电场重构仪(SPIDER)等方法比对测量进行溯源,即单脉冲飞秒激光时域参数测量装置与 SPIDER 等同时测量飞秒激光脉冲脉冲宽度,测量结果若满足(13)式,可验证脉冲宽度测量不确定度指标。

$$|\tau_{\text{FROG}} - \bar{\tau}| \leq \sqrt{\frac{n-1}{n}} U_{\text{rel}} \quad (13)$$

式中: τ_{FROG} 为单脉冲 FROG 脉宽测量值; $\bar{\tau}$ 为 FROG、SPIDER 等方法脉宽测量平均值; U_{rel} 为测量不确定度。

4 结论

钛宝石飞秒激光放大系统具有重复频率低、脉冲波形复杂等特点,为准确测量其峰值功率,提出对单次脉冲波形和脉冲宽度测量的需求。采用频率分辨光学开关法设计了单脉冲飞秒激光时域参数测量装置,通过与光谱相位相干直接电场重构仪等比对测量解决溯源问题,可满足单次飞秒强激光时域脉冲波形及脉冲宽度的测量需求。

参考文献:

- [1] MAINE P, STRICKLAND D, BADO P, et al. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(2): 398-403.
- [2] PERRY M D, PENNINGTON D, STUART B C, et al. Petawatt laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(3): 160-162.
- [3] WANG Z H, LIU C, SHEN Z W, et al. High-contrast 116 PW Ti: sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3194-3196.
- [4] YU T J, LEE S K, SUNG J H, et al. Generation of high-contrast, 30 fs, 15 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti: sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [5] CHU Y X, GAN Z B, LIANG X Y, et al. High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [6] GAN Z B, YU L H, LI S, et al. 200 J high efficiency Ti: sapphire chirped pulse amplifier pumped by temporal dual-pulse[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5169-5178.
- [7] LI M, WANG Z H, TENG H, et al. Prospects for femtosecond ultrahigh intensity laser system towards Exawatt level[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(2): 024201.
- [8] WANG Z H, FANG S B, TENG H, et al. Femtosecond laser user facility for application research on ultrafast science[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(7): 074204.
- [9] ZHANG Zhigang. Femtosecond laser technology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] DENG Yuqiang, SUN Qing, CAO Shiyang, et al. Measurement of ultrashort optical pulses, modern metrology concerns[M]. Rijeka: InTech, 2012.
- [11] WU Lei, YIN Wanhong, YU Bin, et al. Research on femto-second laser pulse width and pulse waveform measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 291-299.
吴磊, 阴万宏, 俞兵, 等. 飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 291-299.
- [12] MONMAYRANT A, WEBER S, CHATEL B. A newcomer's guide to ultrashort pulse shaping and characterization[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2010, 43(10): 103001.
- [13] GALLMANN L, SUTTER D H, MATUSCHEK N, et al. Techniques for the characterization of sub-10-fs optical pulses: a comparison[J]. *Applied Physics B*, 2000, 70(S1): S67-S75.
- [14] TREBINO R. Frequency-resolved optical gating: the measurement of ultrashort laser pulses[M]. Boston, MA: Springer US, 2000.
- [15] WANG Zhaohua, WEI Zhiyi, TENG Hao, et al. Measurement of femtosecond laser pulses using SHG frequency-resolved optical gating technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(2): 362-366.
王兆华, 魏志义, 滕浩, 等. 飞秒激光脉冲的谐波频率分辨光学开关法测量研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(2): 362-366.
- [16] YAO Yao. Research on ultrashort pulse measurement with GRENOUILLE[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
姚尧. 超短脉冲单发频率分辨光学开关法测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [17] LU Linlin, JIA Yudong, ZHANG Xiaoqing. Research progress of frequency resolved optical gating femtosecond pulse width measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 40-46.
鲁琳琳, 贾豫东, 张晓青. 频率分辨光学开关法飞秒脉宽测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 40-46.
- [18] IACONIS C, WALMSLEY I A. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(4): 501-509.
- [19] WANG Peng, WANG Zhaohua, WEI Zhiyi, 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.
- [20] HE Tieying, CHAI Lu, WANG Qingyue, et al. Realization and analysis for a SPIDER apparatus[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(s1): 152-154.
何铁英, 柴路, 王清月, 等. SPIDER光谱相位干涉仪的实现及相关理论分析[J]. *中国激光*, 2004, 31(s1): 152-154.
- [21] WEN Ruhong, LIU Tianfu. Error of spectral intensity and

- phase of femtosecond laser pulse using SPIDER technique[J]. Journal of China University of Metrology, 2006, 17(2): 114-118.
- 文汝红, 刘天夫. 用SPIDER法还原飞秒脉冲振幅和相位误差[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(2): 114-118.
- [22] WEN Ruhong, LIU Tianfu. Optimization of parameters on reconstruction of phase of femtosecond laser pulse with SPIDER[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 340-343.
- 文汝红, 刘天夫. 用SPIDER法重构飞秒脉冲位相中参数的选择[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 340-343.
- [23] ZHANG Suxia, LI Fangjia, LIU Jun. Research progress of self-referenced spectral interferometry on the characterization of femtosecond pulses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010001.
- 张素侠, 李方家, 刘军. 自参考光谱干涉法测量飞秒脉冲的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010001.