

频率分辨光学开关法飞秒脉宽测量技术研究进展

鲁琳琳 贾豫东 张晓青

北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192

摘要 对频率分辨光学开关法(FROG)飞秒脉冲测量技术进行了综合阐述。在FROG法基本原理分析的基础上,以测量技术原理发展变化为主线,介绍了三种不同瞬时响应非线性效应下一三阶非线性效应、二级非线性效应和交叉相位调制(XPM)效应,所构成的不同FROG测量结构的研究现状和发展方向,并综合分析了三种分支技术的性能特点。对各种不同的FROG测量结构进行了详细的比较,得到它们的优缺点及发展前景,为FROG飞秒脉冲测量技术以后的发展提供研究思路和参考。

关键词 超快光学;飞秒脉冲;频率分辨光学开关;非线性效应

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.070005

Research Progress of Frequency Resolved Optical Gating Femtosecond Pulse Width Measurement Technology

Lu Linlin Jia Yudong Zhang Xiaoqing

*Beijing Key Laboratory for Opto-Electronic Measurement Technology, Beijing Information Science and
Technology University, Beijing 100192, China*

Abstract This paper reviews frequency resolved optical gating (FROG) femtosecond pulse width measurement technology. Based on analyzing the principles of FROG, the change and development of measurement technology in theory as the main line, the research status and development direction of different structures of FROG measurement are introduced according to three different transient responses of nonlinear effect, which are third-order nonlinear effect, second-order nonlinear effect and cross-phase modulation (XPM) effect. And the characteristics of three types of branch technology are analyzed comprehensively. Comparing different structures of FROG measurement in detail, their strengths and weaknesses and prospects are obtained. It provides research mentality and references for FROG femtosecond pulse width measurement technology.

Key words ultrafast optics; femtosecond pulses; frequency resolved optical gating; nonlinear effect

OCIS codes 320.2250; 190.4360; 120.3180

1 引言

飞秒脉冲由于其持续时间极短、峰值功率极高、光谱宽度极宽等优点,在生物学、物理学、化学、医学、光通信等方面有广泛的应用^[1-4]。随着飞秒激光的快速发展,飞秒脉冲测量技术也在不断的进步发展。

最早用于飞秒脉冲测量的方法是1967年Weber^[5]建立的强度自相关技术。强度自相关技术只能给出脉冲的宽度信息,在推算脉冲宽度时需要假设脉冲波形,往往会产生很大误差;且不能得到脉冲的相位、形状等信息。后来,Diels等^[6]报道了条纹分辨二次谐波法即干涉自相关法。干涉自相关法可以揭示脉冲中相位的信息,但是这个信息不是唯一的,它不能给出脉冲的全部信息。Kane等^[7-10]在干涉自相关测量法的基础上提出了频率分辨光学开关法(FROG)。它主要是测量自相关信号的频谱,得到二维光谱图也就是FROG行迹,通过脉冲还原算法得到脉冲信息。FROG具有以下优点:1)可以得到详细的飞秒脉冲信息,运用相应的

收稿日期:2015-01-14;收到修改稿日期:2015-03-02;网络出版日期:2015-05-20

基金项目:北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201411232005)、光电测试技术北京市重点实验室开放课题(GDKF2013002)

作者简介:鲁琳琳(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: hpululinlin517@163.com

导师简介:贾豫东(1975—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光电检测技术方面的研究。

E-mail: jyd_blueeye@126.com

算法可重建出脉冲的全部信息;2) 可以测量脉冲宽度小于 10 fs 脉冲;3) 可以实现对还原信号的自一性校验,本身具有检测和部分修正误差的能力。根据瞬时响应的非线性效应的不同,产生的非线性信号不同,可组成不同的 FROG 实验结构。非线性效应主要可以分为三种:三阶非线性效应、二级非线性效应和交叉相位调制(XPM)效应。本文将依次详细介绍比较这些非线性效应组成的不同结构的 FROG,为将来的研究和应用提供相应的参考。

2 FROG 基本原理

FROG 主要思想:待测脉冲两束后通过非线性晶体产生相应的非线性信号,并由光谱仪和 CCD 接收所产生的信号,光谱仪对每个延时点的非线性信号进行光谱分辨,CCD 记录光谱强度随时间延迟的变化,即为 FROG 行迹。

非线性信号可表示为

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

式中 $E(t)$ 是探测光, $g(t - \tau)$ 是开关光, τ 是探测脉冲和开关脉冲之间的时间延迟。

CCD 记录的 FROG 行迹可表示为

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

对于不同的非线性效应,开关光 $g(t - \tau)$ 是不同,这也就形成了不同实验结构的 FROG。

3 FROG 测试方法

3.1 基于三阶非线性效应的 FROG 测试方法

1993 年, Trebino 等^[8]搭建了偏振型光频率分辨光学开关(PG-FROG)测量装置,如图 1 所示。被测脉冲先被分成两束: $E(t)$ 和 $E(t - \tau)$ 。探测脉冲 $E(t)$ 通过正交偏振片作为探测光;门脉冲 $E(t - \tau)$ 经过可变延迟后经过一个半波片改变其偏振方向 45° 作为开关光。两束光会聚到三阶非线性晶体上,开关光由于克尔效应在非线性晶体上产生二次光折射。当两束光在时间上重合时,由于二次光折射导致探测光的偏振产生微变,从而能有一部分信号光可以通过之后的正交偏振片,信号光通过光谱仪的入射狭缝后在 CCD 上成像,得到二维光谱图,即 FROG 行迹。这种情况下的开关光为 $g(t - \tau) = |E(t - \tau)|^2$ 。实验装置测量了中心波长为 620 nm、重复频率为 100 MHz 的飞秒脉冲, FROG 误差设为 0.5%, 得到飞秒脉宽为 110 fs, 并带有正啁啾。

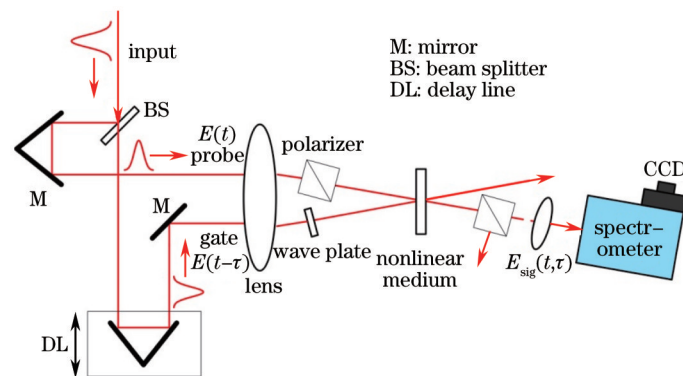


图 1 PG-FROG 实验结构图

Fig.1 PG-FROG experimental structure

2005 年,王兆华等^[11]建立了一台 PG-FROG 测量装置,对“极光 II 号”钛宝石飞秒激光放大系统的重复频率为 10 Hz、中心波长为 800 nm 的飞秒脉冲进行了测量,并在激光系统工作在无啁啾和有啁啾的情况下测得飞秒脉冲的电场、光谱和相位及啁啾的信息。2014 年,李恪宇等^[12]主要对 I 类二倍频 BBO 晶体的位相失配量进行了详细的分析和研究,晶体失配量增加,脉冲的脉宽先降低后升高呈“U”行变化,脉宽的测量采用 PG-FROG 实验系统。

用 PG-FROG 测量飞秒脉宽,得到的 FROG 行迹是直观的,可以直接从行迹中观察到脉冲的啁啾信息。此外它可自动进行相位匹配,这使得它可用于长脉冲的测量。但 PG-FROG 的探测脉冲需要通过一个偏振

片,这使它不适合用于极短脉冲和紫外脉冲的测量。

1993年,Kane等^[7]搭建了自衍射型频率分辨光学开关(SD-FROG)测量装置,这种情况下开关光为 $g(t-\tau)=E(t)E^*(t-\tau)$ 。利用这种装置对中心波长为620 nm、重复频率为100 MHz的飞秒脉冲进行测量,得到有正啁啾的脉宽约为200 fs的飞秒脉冲。用SD-FROG测量飞秒脉冲,得到的FROG行迹比PG-FROG行迹包含更多其他复杂的信息,因此不太容易进行脉冲的重建,且光路系统较为复杂。但两束光的偏振态相同,不需要偏振片;此外它还可用于紫外脉冲和极短脉冲的测量。

2011年,徐永生等^[13]用瞬态光栅衍射法搭建了一台单次频率光学开关实验装置。这种装置可对10 ps以内的紫外超短脉冲进行单次测量,利用此装置对激光系统工作在无啁啾和有啁啾情况下的重复频率为10 Hz的飞秒脉冲进行了测量,得到了飞秒脉冲的波形、相位分布。这样的实验装置可以解决紫外超短脉冲测量困难的问题。

3.2 基于二阶非线性效应的FROG测试方法

FROG的实现还可以利用二阶非线性效应。1994年,DeLong等^[10]在FROG实验结构中提出了用能产生二次谐波效应的非线性晶体来产生信号光,即为二次谐波频率分辨光学开关法(SHG-FROG)。如图2所示,被测脉冲分成两束,然后在二阶非线性晶体中重叠,产生非共线自相关信号作为非线性信号。这个信号作为输入光被送入光谱仪,其强度信号被CCD阵列记录,得到FROG行迹。这种情况,开关光为 $g(t-\tau)=E(t-\tau)$ 。利用此装置对钛蓝宝石飞秒激光的飞秒脉冲进行了测量,得到中心波长750 nm的飞秒脉冲的脉宽为90 fs;对飞秒脉冲引入已知的相位失真(在待测脉冲进入实验装置前先通过厚度为6.5 cm的玻璃),得到脉宽为179 fs,啁啾参数为 $b=8.3\times 10^{-6}\text{fs}^{-2}$ 。

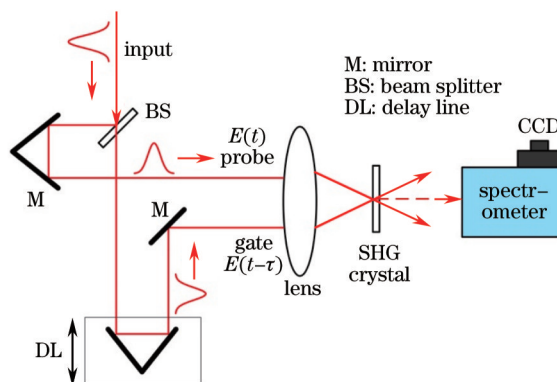


图2 SHG-FROG实验结构图

Fig.2 SHG-FROG experimental structure

2001年,Shea等^[14]对SHG-FROG的光路系统进行改进,提出了单发频率分辨光学开关法(GRENOUILLE)。GRENOUILLE主要由两大改进,如图3所示,1)用一块菲涅耳双棱镜代替了分束镜、延迟线和会聚透镜;2)用一块厚的SHG晶体代替薄的SHG晶体和光谱仪。这样的装置紧密简洁,有极其简单的对齐方式,并且需要成本低。

2004年,Selcuk等^[15-16]用Proustite晶体代替传统的BBO晶体搭建GRENOUILLE实验装置来测量1.5 μm的飞秒脉冲。最早提出GRENOUILLE是用于测量波长在700~1000 nm范围的脉冲,使用的是BBO晶体,但不能用于测量1.5 μm波长的脉冲。Proustite晶体有很大的相位匹配色散和大的非线性光学系数可以满足这个范围的飞秒脉冲的测量。2007年,Liu等^[17]对GRENOUILLE进行了数值模拟仿真,与用实验得到的结果相符合,验证了GRENOUILLE中脉冲重建算法的可行性。

2003年,王兆华等^[18]搭建了SHG-FROG测量装置,对中心波长约为800 nm掺钛蓝宝石飞秒激光的飞秒脉冲进行测量,得到飞秒脉冲宽度约为28.6 fs,还得到了飞秒脉冲的形状、光谱、相位等信息。2006年,刘山亮等^[19]利用SHG-FROG对在色散平坦光纤中传输前后的短脉冲进行了测量比较。超短脉冲在经过色散平坦光纤后脉宽展宽了,啁啾也增大了,实验结果和理论分析是相符的。2007年,刘文军等^[20]用反射式达曼光栅代替分束镜,建立反射式达曼光栅频率分辨光学开关法。用一块达曼光栅作为分束器,另外两块达曼光栅作为色散补偿光栅。避免了使用半透半反镜引起的光谱色散和脉冲畸变。并对此装置和传统SHG-

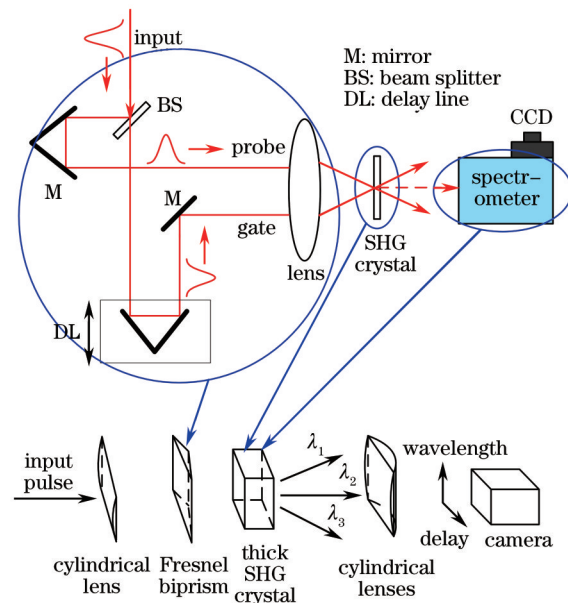


图3 GRENOUILLE实验系统和SHG-FROG系统的比较

Fig.3 Comparison of GRENOUILLE and SHG-FROG experimental system

FROG 装置测量的结果进行了分析对比,脉宽小于 50 fs 时用反射式达曼光栅这样的实验装置比较好。2009 年,刘文军等^[21]利用 SHG-FROG 实验装置对飞秒脉冲经过色散表面前后的特性进行了分析比较。飞秒脉冲在通过色散表面后将导致脉冲的展宽和畸变,并分析了脉冲畸变和脉宽展宽的原因。2009 年,Bender 等^[22]从 SHG-FROG 行迹中通过计算得到 MOSAIC 行迹,从 MOSAIC 行迹中可以直接观察到脉冲的啁啾信息,而不需要脉冲重建算法的迭代过程。2011 年,徐灿华等^[23]用 SHG-FROG 对红外波长的超短脉冲进行了单次测量,用两个半圆形全反平面镜代替半透半反镜避开在红外波段介质膜难镀的问题,并提高了测量的精度。2011 年,王喆等^[24]搭建了 SHG-FROG 实验装置,对飞秒级超短脉冲离散衍射的出射光进行定量测量,研究飞秒脉冲经过光子晶格后对飞秒脉冲的脉宽、谱宽、相位等参数的影响,光子晶格对超短脉冲的时频域特性有全面灵活的调控能力。2012 年,文汝红^[25]用 SHG-FROG 对中心波长为 755 nm、重复频率为 100 MHz 的 KLM 钛宝石激光进行测量,通过算法重建得到飞秒脉冲的脉宽为 17.8 fs。

目前有很多机构在研究基于二阶非线性效应的 FROG。美国乔治亚理工学院搭建 GRENOUILLE 对飞秒脉冲时空畸变、空间啁啾和脉冲前沿倾斜进行研究^[26]。中国工程物理研究院激光聚变研究中心用 GRENOUILLE 实验装置分析了光束空间轮廓对 FROG 行迹的影响,并用数据一致性校验排除了光束空间轮廓引起的脉冲畸变信息^[27]。华中科技大学也搭建了 GRENOUILLE 实验系统,从有噪声的 FROG 行迹中重建出脉冲,并研究了经过色散介质后脉冲宽度在时域上展宽了,频率产生了啁啾^[28]。哈尔滨理工大学搭建了 GRENOUILLE 系统对飞秒脉冲进行测量,详细研究了脉冲重建算法,并对算法进行了模拟验证,和实验解调出的结果是一致的^[29]。日本分子科学研究所提出用带有脉冲前沿倾斜的脉冲作为参考脉冲搭建 FROG 实验系统来解决载波包络相位的问题^[30]。传统的 FROG 不能决定飞秒脉冲的载波包络相位信息,联合 FROG 和电子采样可实现这个功能,并通过对复杂飞秒脉冲的实时检测验证了此方法的可行性。

本课题组采用 GRENOUILLE 实验系统进行飞秒脉宽的测量,对脉冲重建算法进行了详细研究。此外通过对脉冲重建算法的模拟仿真,确定脉冲重建算法—主分量广义投影算法(PCGPA),它是基于矩阵矢量的运算,简化了算法程序,提高脉冲重建的速度。

用基于二阶非线性效应的 FROG 实验结构得到的 FROG 行迹在时间方向上有模糊性,因此不能确定光谱相位失真和时域相位失真(比如线性啁啾)。但是它能测量强度小于 -1 MW 的脉冲,而用 PG-FROG 和 SD-FROG 测量峰值强度小于 10 W 的脉冲是困难的。

3.3 基于 XPM 制效应的 FROG 测试方法

XPM 型的 FROG 是将探测脉冲和门脉冲在不同的延迟线进入非线性介质(如高非线性微结构光纤、单模光纤等),两束光在光纤中产生 XPM 效应,使探测脉冲在门脉冲的调制下产生相移,从而生成信号光。此

种情况下,开关光为 $g(t-\tau) = \exp[ai\gamma|E(t-\tau)|^2]$, 其中 $a=4/3$, γ 是光纤的非线性系数, L 是在光纤中发生 XPM 效应的长度。

2012年,庞杰^[31]利用高非线性微结构光纤(HNL-PCF)中的 XPM 效应搭建 FROG 实验装置,如图 4 所示。待测脉冲要先被分成两束,在不同的延迟下以偏振正交状态进入 HNL-PCF 中产生 XPM 效应,得到信号光,最后由光谱仪和 CCD 记录所得到的 FROG 行迹。对高斯脉冲和复杂脉冲进行模拟仿真验证了此系统的可用性。

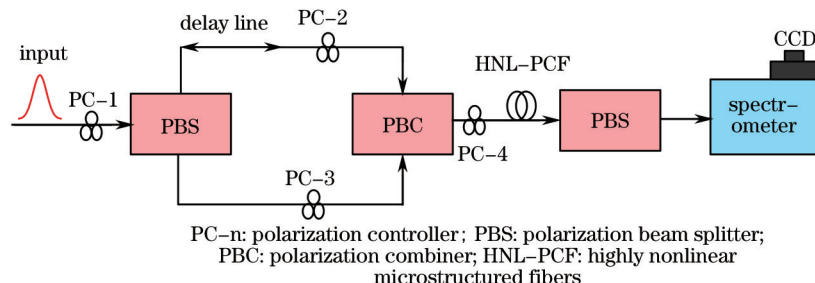


图 4 基于 HNL-PCF 的 XPM-FROG 实验结构

Fig.4 Experimental structure of XPM-FROG based on HNL-PCF

2014年,马晓璐等^[32]利用单模光纤的光弹效应和 XPM 效应提出了 FROG 脉冲测量方案,如图 5 所示。单模光纤的前一部分 I 产生可变延迟,后一部分 L 作为非线性介质产生非线性效应,对单模光纤 I 的一段施加均匀的侧向压力 F 。单模光纤在 F 的作用下发生光弹效应,产生应力双折射,形成两个偏振正交、相对延迟为 τ 的线偏振模。通过改变外加应力 F 的大小,可以得到可变的相对延迟 τ 。这两个线偏振模分别作为探测脉冲和门脉冲,在单模光纤 L 中传输发生 XPW 效应,生成信号脉冲,通过偏振分束器后滤出信号光,最后经过光谱仪和 CCD 记录 FROG 行迹。利用此实验装置进行了相应的实验,并由脉冲重建算法得到所测脉冲的信息。

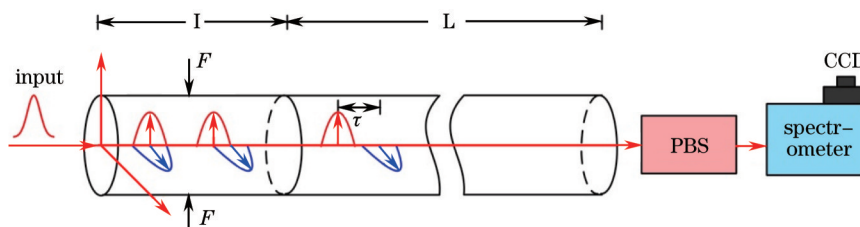


图 5 基于单模光纤的 XPM-FROG 测量原理

Fig.5 Principle of XPM-FROG based on single-mode fiber

XPM-FROG 和以上两种效应的 FROG 相比,其优点为:没有复杂的光路调节和校准、成本低、抗电磁干扰、可测量全波段的脉冲,有很好的应用前景。

4 结 论

通过对三种不同非线性效应构成的不同 FROG 实验结构进行了详细分析和比较,基于三阶非线性效应的 PG-FROG 和 SD-FROG 所测得的 FROG 行迹比较直观,但是实验装置较为复杂,会引入误差,在搭建实验系统时有排列对齐难的问题,且不能测强度低的飞秒脉冲。基于二阶非线性效应的 FROG 系统所测得的 FROG 行迹不直观,不能直接观察到脉冲的啁啾信息,但可以测量强度低于 -1 MW 的脉冲;在 SHG-FROG 基础上进行改进的 GRENOUILLE 实验装置需要的元件少,成本低,且排列对齐很简单,因此已得到广泛的应用。基于交叉相位调制效应的 FROG 系统可以综合了他们的优点,XPM-FROG 不需要搭建空间光路、结构简单、抗干扰等优点,且所测得的 FROG 行迹也比较直观。综合以上的分析,XPM-FROG 具有更加广阔的发展前景和应用范围。

参 考 文 献

- 1 Lin Zunqi, Chen Weibiao, Lou Qihong, *et al.*. Review on the recent progress of laser frontiers in China[J]. Science China: Technology Science, 2013, 43(9): 961-978.

- 林尊琪, 陈卫标, 楼祺洪, 等. 我国近期激光前沿若干重要进展评述[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(9): 961-978.
- 2 Yang Qing, Du Guangqing, Chen Feng, *et al.*. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502005.
- 杨青, 杜广庆, 陈烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502005.
- 3 Yao Yunhua, Lu Chenhui, Xu Shuwu, *et al.*. Femtosecond pulse shaping technology and its applications[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 184201.
- 姚云华, 卢晨晖, 徐淑武, 等. 飞秒激光脉冲整形技术及其应用[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 184201.
- 4 Sun Siming, Sun Yunlu, Liu Dongxu, *et al.*. Protein functional devices manufactured by femtosecond laser direct writing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080003.
- 孙思明, 孙允陆, 刘东旭, 等. 飞秒激光直写制备蛋白质功能化器件[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080003.
- 5 H P Weber. Method for pulse width measurement of ultrashort light pulses generated by phase-locked lasers using nonlinear optics[J]. J Appl Phys, 1967, 38(5): 2231-2234.
- 6 J C Diels, E W Van Stryland, D Gold. Investigation of the Parameters Affecting Subpicosecond Pulse Durations in Passively Mode Locked Dye Lasers in Picosecond Phenomena[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 117-120.
- 7 D J Kane, R Trebino. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating[J]. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(2): 571-579.
- 8 Rick Trebino, Daniel J Kane. Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating[J]. J Opt Soc Am B, 1993, 10(5): 1101-1111.
- 9 Daniel J Kane, Rick Trebino. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating[J]. Opt Lett, 1993, 18(10): 823-825.
- 10 K W Delong, R Trebino, J Hunter, *et al.*. Frequency-resolved optical gating with the use of secondharmonic generation [J]. J Opt Soc Am B, 1994, 11(11): 2206-2215.
- 11 Wang Zhaohua, Wei Zhiyi, Zhang Jie. Measurement of femtosecond laser pulses using PG frequency-resolved optical gating[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(3): 1194-1199.
- 王兆华, 魏志义, 张杰. 飞秒激光脉冲的频率分辨偏振光学开关法测量研究[J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1194-1199.
- 12 Li Keyu, Feng Bin, Sun Li, *et al.*. Nonlinear pulse width change of nonchirped pulse versus crystal mismatch by cascaded harmonic generation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1219002.
- 李恪宇, 冯斌, 孙立, 等. 基于级联倍频机制无啁啾激光脉宽随晶体位相失配量的非线性变化[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1219002.
- 13 Xu Yongsheng, Tang Xiuzhang, Zhang Ji, *et al.*. Single-shot measurement of UV ultrashort pulse laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2381-2385.
- 徐永生, 汤秀章, 张骥, 等. 紫外超短脉冲激光的单次测量[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2381-2385.
- 14 P O' Shea, Mark Kimmel, Xun Gu, *et al.*. Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. Opt Lett, 2001, 26(12): 932-934.
- 15 Selcuk Akturk, Mark Kimmel, Rick Trebino. Extremely simple device for measuring 1.5- μm ultrashort laser pulses[J]. Opt Express, 2004, 12(19): 4483-4489.
- 16 Selcuk Akturk, Mark Kimmel, Rick Trebino. Ultrasimple FROG device for measuring ultrashort pulses at 1.5-micron wavelengths[C]. LEOS, 2004, 2: 737-738.
- 17 Xuan Liu, R Trebino, Arlee V Smith. Numerical simulations of the ultrasimple ultrashort-laser-pulse measurement technique, GRENOUILLE[C]. QELS, 2007: JThD8.
- 18 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.
- 19 Liu Shanliang, Zheng Hongjun. Experimental research on the characteristic measurement of the short pulses before and after propagating in dispersion-flattened fiber[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(2): 199-205.
- 刘山亮, 郑宏军. 短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究[J]. 中国激光, 2006, 33(2): 199-205.
- 20 Liu Wenjun, Li Guowei, Zhou Changhe, *et al.*. Frequency-resolved optical gating using refractive Dammann gratings[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(8): 1136-1139.
- 刘文军, 李国伟, 周常河, 等. 基于反射式达曼光栅的频率分辨光学开关装置[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1136-1139.

- 21 Liu Wenjun, Ren Shoutian, Qu Shiliang, *et al.*. Temporal characteristics of femtosecond pulse propagation through a scattering surface[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1160–1165.
刘文军, 任守田, 曲士良, 等. 飞秒脉冲通过散射表面后的时域特性[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1160–1165.
- 22 D A Bender, M S Bahae. Complimentary ultrashort laser pulse characterization using SHG FROG and MOSAIC[C]. CLEO/QELS, 2009: JTuD47.
- 23 Xu Canhua, Leng Yuxin, Zhang Chunmei, *et al.*. Using SHG–FROG to measure intensity and phase of infrared long wavelength ultra–fast laser pulse in single shot[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0308004.
徐灿华, 冷雨欣, 张春梅, 等. 采用 SHG–FROG 单次测量红外长波长超快激光脉冲宽度和相位[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308004.
- 24 Wang Zhe, Tang Baiquan, Yang Chengliang, *et al.*. Temporal properties of ultrashort laser pulses in photonic lattice by SHG–FROG technique[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 747–752.
王 喆, 唐柏权, 杨程亮, 等. 光子晶格中超短脉冲光的时域特性[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 747–752.
- 25 Wen Ruhong. Measurement of femtosecond laser pulses using frequency–resolved optical gating technique[J]. Applied Laser, 2012, 32(2): 143–146.
文汝红. 频率分辨光学开关法测量飞秒脉冲的研究[J]. 应用激光, 2012, 32(2): 143–146.
- 26 Selcuk Akturk. Extending Ultrashort–Laser–Pulse Measurement Techniques to New Dimensions, Time Scales, and Frequencies[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005: 27–110.
- 27 Zhou Song, Peng Zhitao, Xia Yanwen, *et al.*. Effects of spatial beam profile on GRENOUILLE trace[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2059–2062.
周 松, 彭志涛, 夏彦文, 等. 无光栅频率分辨光学开关行迹分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2059–2062.
- 28 Wang Yan. System for Measuring Intensity and Phase of Femtosecond Laser Pulse[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008: 15–57.
王 艳. 飞秒激光脉冲强度与相位测量系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 15–57.
- 29 Ren Weixin. Research on the Femtosecond Pulse Retrieval Technology of GRENOUILLE[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014: 29–49.
任伟新. 单发频率分辨光学开关法中的飞秒脉冲解调技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014: 29–49.
- 30 Takao Fuji, Hideto Shirai, Yutaka Nomura. Real–time lightwave measurement by using FROG capable of CEP determination with pulse–front tilt[C]. CLEO, 2014: SF1E.
- 31 Pang Jie. Ultra–Short Laser Pulse Measurement Based on PCF[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012: 26–45.
庞 杰. 基于微结构光纤的超短脉冲测量[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012: 26–45.
- 32 Ma Xiaolu, Li Peili, Guo Haili, *et al.*. Cross–phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra–short pulses using a single mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(24): 240601.
马晓璐, 李培丽, 郭海莉, 等. 基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 240601.

栏目编辑: 何卓铭