

快速扫描频率分辨光学开关装置测量超短激光脉冲

文锦辉 胡婷 吴琴菲

Measurement of ultrashort laser pulses with rapid-scanning frequency-resolved optical gating device

Wen Jin-Hui Hu Ting Wu Qin-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 110601 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190034

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190034>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于瞬态光栅频率分辨光学开关法测量飞秒脉冲的研究

Measurement of femtosecond pulses based on transient grating frequency-resolved optical gating

物理学报. 2019, 68(7): 070602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190165>

基于瞬态光栅频率分辨光学开关装置的阿秒延时相位控制

Attosecond relative delay measurement using transient-grating frequency-resolved optical gating

物理学报. 2018, 67(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181570>

超短激光脉冲波形的单次测量技术

A new technique for measuring single-shot ultrashort laser pulse

物理学报. 2017, 66(4): 044204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044204>

基于光纤色散相位补偿的高分辨率激光频率扫描干涉测量研究

High-resolution laser frequency scanning interferometer based on fiber dispersion phase compensation

物理学报. 2015, 64(21): 219501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.219501>

超短脉冲激光烧蚀石墨产生的喷射物的时间分辨发射光谱研究

Study of the time-resolved emission spectra of the ejected plume generated by ultrashort laser ablation of graphite

物理学报. 2015, 64(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.64.214201>

黑体辐射法测量电介质内部被超短激光脉冲加工后的温度

Measuring the internal temperature of dielectrics machined by the ultrashort laser pulse through the black-body irradiation method

物理学报. 2016, 65(12): 125201 <https://doi.org/10.7498/aps.65.125201>

快速扫描频率分辨光学开关装置 测量超短激光脉冲*

文锦辉[†] 胡婷 吴琴菲

(中山大学物理学院, 广州 510275)

(2019年1月7日收到; 2019年3月6日收到修改稿)

频率分辨光学开关法是目前测量超短激光脉冲的主流方法之一. 本文比较了三大类二次谐波频率分辨光学开关系统的特点和适用范围, 提出将标准二次谐波频率分辨光学开关法改装成一种快速扫描频率分辨光学开关法 (frequency-resolved optical gating, FROG) 装置. 利用信号发生器输出的正弦信号同步地驱动音圈电机和扫描振镜, 其中音圈电机带动直角反射镜往复运动可实现快速的延时扫描, 与此同时扫描振镜快速转动进而按照延时顺序将自相关信号光谱反射至面阵相机感光面上的不同位置. 该正弦信号还用于触发面阵相机持续曝光, 即可拍摄到一幅完整的 FROG 迹线图, 曝光时间可小于 1 s. 该方案在需要记录较大矩阵 FROG 迹线图的情形颇具优势, 例如可实现色散大的啁啾脉冲和结构复杂的超短脉冲的实时测量. 通过测量来自锁模钛宝石激光器输出的飞秒脉冲以及被 200 mm 厚的 BK7 玻璃块展宽后的啁啾脉冲的结构, 证实了该装置的实用性.

关键词: 频率分辨光学开关法, 超短脉冲, 实时测量, 快速扫描**PACS:** 06.60.Jn, 07.60.-j, 42.30.Rx, 42.30.Va**DOI:** 10.7498/aps.68.20190034

1 引言

超短激光脉冲在光化学、量子相干控制、显微成像、光通信、微加工等领域具有重要的应用^[1-4]. 频率分辨光学开关法 (frequency-resolved optical gating, FROG) 是目前测量超短脉冲的主流方法之一^[5-7], 因实验装置简单、适用范围广等特点而得到广泛应用. 其中二次谐波频率分辨光学开关法 (SHG-FROG)^[8-11] 与其他利用三阶非线性效应的 FROG 系统相比灵敏度高出很多, 因而用途最广. 现有 SHG-FROG 系统可分成 3 大类. 1) 标准 SHG-FROG: 由强度自相关仪改装而成, 延迟线走一步拍摄一个一维自相关信号光谱, 然后将这些光谱按延时顺序整合成一个二维谱图 (称为 FROG

迹线). 其优点是适用范围最广, 灵敏度高, 可测量不同波段、带宽和脉宽的超短脉冲, 尤其适用于各种高重复频率的锁模激光振荡器; 缺点是测量速度较慢, FROG 谱图的阵列数越大拍摄时间越长. 2) 单发 SHG-FROG^[12,13]: 将脉冲光扩束之后分成两束并以特定角度用柱透镜聚焦到倍频晶体上, 形成延时与空间坐标的线性关系, 用面阵相机可一次性获得二维 FROG 迹线. 由于不需要扫描延时, 因而测量速度很快; 缺点是灵敏度比标准 SHG-FROG 低约 2 个数量级, 主要适用于重复率较低 (1—1000 Hz) 的脉冲放大器输出的超短脉冲. 3) GRENOUILLE (grating-eliminated no-nonsense observation of ultrafast incident laser light E-fields)^[14,15]: 它实际上是一种特殊结构的单发 SHG-FROG, 仅由 5 个元件组成, 结构紧凑且不需

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11534017) 和国家自然科学基金 (批准号: 61575223) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wenjh@mail.sysu.edu.cn

调整, 选用厚晶体因而灵敏度高; 缺点是适用范围较窄, 每台 GRENOUILLE 只能测量限定的带宽、脉宽和波长范围内的超短脉冲.

根据 FROG 脉冲重构算法的原理, 重构出来的脉冲的强度包络 $I(t)$ 和相位曲线 $\phi(t)$ 的有效数据点与 FROG 迹线的阵列数 N 密切相关, N 越大则脉冲结构的细节将越清晰. 如要准确测量结构复杂 (包括色散大的) 的脉冲, 需要记录大矩阵 FROG 迹线图 (如 512×512 , 甚至 2048×2048). 而随着数字成像技术的持续发展, 数百万乃至上千万像素的面阵电荷耦合器/金属氧化物半导体 (CCD/CMOS) 相机日渐普及. 例如目前 2048×2048 像素的面阵 CCD 相机的刷新速度可达 10 fps 以上; 相同像素的 CMOS 相机速度可达 90 fps 以上.

单发 SHG-FROG 和 GRENOUILLE 能够利用面阵相机实时拍摄 FROG 谱图, 但其适用范围相对较窄; 而标准 SHG-FROG 需拍摄很多幅一维谱图然后整合处理, 因而速度较慢. 为此, 本文参照国际上一些实时自相关方法^[16-19], 提出一种快速扫描 FROG 装置, 可在标准 SHG-FROG 上使用面阵相机实时拍摄 FROG 谱图.

2 实验装置

快速扫描 FROG 装置的结构如图 1 所示. 水平偏振的待测脉冲被分束片分成两路传播: 一路透过分束片后依次被一个直角反射镜和一个反射镜反射; 另一路被分束片反射后再经安装在音圈电机滑台上的直角反射镜反射. 这两束光保持平行传播, 随后被凹面反射镜聚焦到倍频晶体上产生倍频自相关信号. 自相关信号脉冲先由透镜 F_1 准直为平行光束, 再由潜望镜将其偏振方向由垂直改为水平, 然后被反射光栅在水平方向上将光谱展开, 再由透镜 F_2 和扫描振镜聚焦反射至面阵相机的感光面上. 此外, 信号发生器输出的正弦信号也分成两路, 一路被功率放大器放大后用于驱动音圈电机, 使其滑块负载着直角反射镜做快速的往复运动, 从而实现两路光束之间的延时扫描; 另一路则同步驱动扫描振镜做小角度上下摆动. 于是自相关信号脉冲的光谱将按延时顺序依次照射到面阵相机感光面的不同位置. 而且可用该正弦信号触发面阵相机在延时扫描过程中持续曝光, 即可拍摄到一幅完整的 FROG 迹线图. 信号发生器的扫描频率一般设

为 1—100 Hz, 即 FROG 谱图的拍摄时间可小于 1 s, 最短可达 10 ms. 而该装置能够测量的脉冲宽度范围主要取决于所选用的音圈电机的最大行程. 例如音圈电机的行程为 25 mm, 应可测量脉宽从几个 fs 到 60 ps 范围内的超短脉冲.

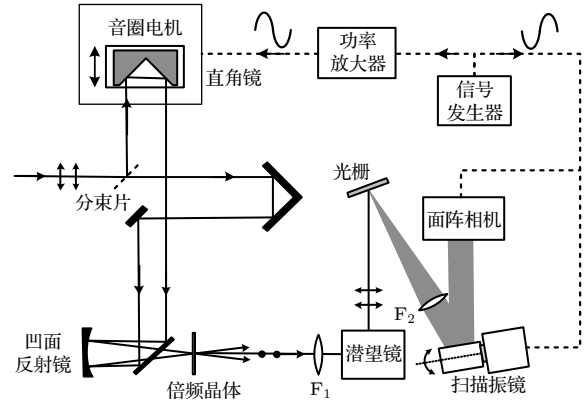


图 1 快速扫描 FROG 装置结构图

Fig. 1. Experimental setup of rapid-scanning FROG device.

为了获得高质量的 FROG 谱图, 需要对该装置进行一些优化设置.

1) 调节信号发生器输出恒定振幅的正弦波形, 这样扫描振镜反射的自相关光谱将重复扫描包括面阵相机感光面在内的固定区域. 为了提高相机感光面所对应的延时扫描的线性度, 建议选择振镜的扫描区域比相机感光面大 3 倍以上. 而音圈电机的振幅决定了延时扫描的范围, 因此需根据被测量脉冲的宽度来设定延时扫描的范围. 可通过调节功率放大器的音量旋钮改变音圈电机的振幅, 从而设定延时扫描的量程.

2) 信号发生器设定的正弦信号频率必须低于面阵相机的帧率. 在此基础上, 对于强度较弱的或者脉宽较长的脉冲, 因自相关信号较弱, 应设定较低的正弦信号频率使得自相关信号脉冲光谱在面阵相机上照射较长时间从而充分曝光; 而对于较强的脉冲则可提高信号频率使光谱信号快速扫过面阵相机. 这样就不必采用衰减片来调节入射 FROG 装置的待测脉冲强度, 即可获取高信噪比的 FROG 谱图. 本装置的一个优点是可以先设定较大的延时扫描量程以便快速浏览 FROG 谱图的全景及亮度分布情况, 然后再设置合适的延时扫描量程和扫描频率以便获得尽可能多的有效数据量及较高的图像对比度, 这将有助于提高脉冲重构的精确度.

3) 实际上在信号发生器正弦信号的正半周期

和负半周期内各出现一次自相关信号. 由于音圈电机滑块的往复运动存在相位滞后问题, 因而这两个自相关信号的 FROG 谱图很难在面阵相机感光面上完全重合. 因此应设定面阵相机只在其中的半个正弦周期进行拍摄. 另外, 可将扫描振镜安装在手动旋转台上以便调整振镜的初始位置, 使得扫描延时的 0 点刚好对应相机感光面的中央, 这将有助于拍摄到有效数据点尽量多的 FROG 谱图.

4) 合理选定聚焦透镜 F_2 的焦距, 使扫描振镜中心点对于面阵相机的张角 $< 6^\circ$, 以便将 FROG 谱图的延时误差限制在 1% 以内. 另外选择适当焦距的准直透镜 F_1 , 与聚焦透镜 F_2 配合, 尽量将某一延时下的自相关脉冲光谱在面阵相机上的横向尺寸缩小至 1 个像素左右, 可减少不同延时的自相关脉冲光谱相互叠合. 这意味着选择像素较大的面阵相机会比较有利.

5) FROG 谱图的光谱和延时坐标都需要校正. 其中光谱校正方法已很成熟, 在此不赘述. 至于延时坐标的校正, 可根据不同的延时扫描量程定制 5—8 个厚度不同的透明聚酯薄膜或者玻璃薄片. 将薄片插入测量光路的其中一臂可在两臂之间产生附加光程差. 这时面阵相机拍摄到的 FROG 谱图将会在时间轴方向产生一个相对的平移量, 由此可计算出延时的坐标尺度. 建议在同一扫描量程下插入多个不同厚度的薄片, 拟合出光程差改变量与图像平移量的线性关系, 从而以实现准确的延时定标. 所有的延时扫描量程定标后即可为以后的测量带来便利.

3 实验结果与分析

为了验证该快速扫描 FROG 装置的实用性, 我们测量了一台自制的自锁模钛宝石飞秒激光器输出的脉冲 (标记为脉冲 A) 及其被一块厚 200 mm 的 BK7 玻璃展宽而得到的啁啾脉冲 (标记为脉冲 B). 该钛宝石飞秒激光器在 5 W 绿光泵浦条件下输出脉冲的平均功率为 500 mW, 脉冲重复率为 95 MHz, 即单脉冲能量约为 5 nJ. 另外脉冲的波长调谐范围为 780—860 nm. 脉冲的宽度通常在 30—80 fs 范围内改变, 与脉冲中心波长、脉冲带宽以及用于色散补偿的石英棱镜对的调整状态有关. 选用的 BBO 倍频晶体厚度为 30 μm , 凹面反射镜焦距为 5 cm, 透镜 F_1 和 F_2 的焦距分别为 30 cm

和 12 cm, 反射光栅的常数为每毫米 1200 线, 闪耀波长为 500 nm. 另外选用行程 10 mm 的音圈电机 (SMAC 公司), 光束直径 10 mm 的单轴扫描振镜 (Thorlabs 公司), 以及像素为 2736×2192 的面阵 CCD 相机 (Point Grey 公司, 像元 $4.54 \mu\text{m} \times 4.54 \mu\text{m}$, 帧率 13 fps). 扫描振镜至面阵相机的距离为 9 cm. 信号发生器正弦信号频率设为 4 Hz, 振幅设为 8 V. 通过功率放大器可调节延时扫描的量程.

图 2(a) 和图 2(b) 为两个待测脉冲在量程 1 的 FROG 迹线图. 可以看出在该量程下脉冲 A 在时间轴方向上的有效数据点很少; 而脉冲 B 有效数据点足够多, 应可准确重构脉冲的形状. 调节功率放大器改为扫描量程 2, 再拍摄脉冲 A 的 FROG 迹线图 (如图 2(c)), 可得到较多的有效数据点. 采用两片分别产生 85 fs 和 260 fs 附加延时的透明聚酯薄膜用于校正延时, 通过插入薄膜后 FROG 谱图的相对位移来确定延时坐标的比例系数. 可以看出拍摄到的几个 FROG 谱图都出现了少量横条纹, 经分析是由音圈电机振动引起, 因而需先对谱图做适当的平滑处理, 然后才能进行脉冲重构运算. 考虑到运算速度问题, 将图 2(b) 和图 2(c) 采样为 256×256 矩阵, 然后采用国际通用的 FROG 算法程序^[20] 重构出两个被测脉冲的结构, 容许误

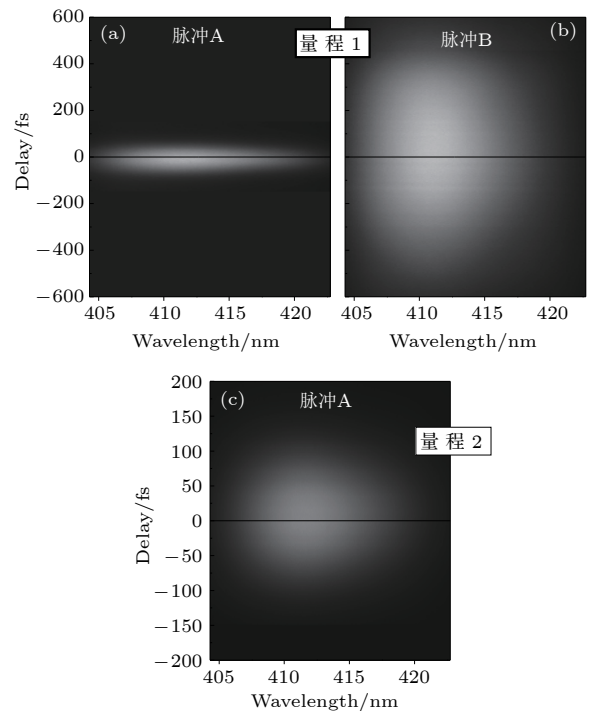


图 2 脉冲 A 和脉冲 B 的 FROG 迹线图
 Fig. 2. FROG traces of pulses A and B.

差设为 0.5%. 图 3 和图 4 分别是重构出来的脉冲 A 和脉冲 B 在时域上的强度包络和相位曲线, 以及通过傅里叶变换得到的这两个脉冲的光谱分布和光谱相位曲线. 可知脉冲 A 和脉冲 B 的脉冲宽度分别为 58 fs 和 492 fs, 两个脉冲的中心波长为 813 nm, 带宽 $\Delta\lambda = 18$ nm. 说明 200 mm 厚 BK7 玻璃块将飞秒激光器输出的脉冲展宽了 8.5 倍. 由于本次实验中飞秒激光脉冲的带宽偏窄, 因而被玻璃块展宽的比例并不算大. 由这两个脉冲的光谱相

位曲线分别算出它们的群延时色散 (GDD) 然后相减, 可得到该 BK7 玻璃块的 $GDD = 8740 \text{ fs}^2$, 与理论值 8815 fs^2 比较接近, 由此可推断该装置测量超短脉冲的准确性. 而实验上确实展示了通过改变该装置的扫描量程来测量不同宽度的超短脉冲, 并且选择合适的扫描量程可以获得足够多的有效数据点, 有利于脉冲的准确重构. 因该装置选用了行程 10 mm 的音圈电机, 应可测量脉宽在 24 ps 以内的激光脉冲.

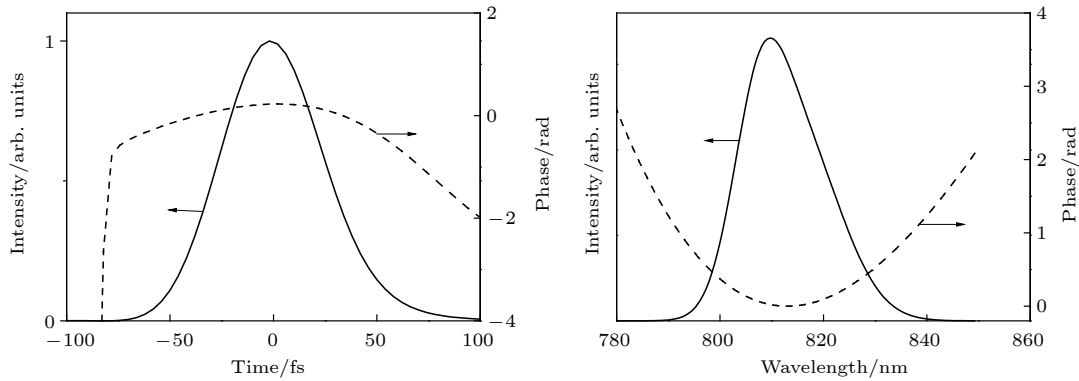


图 3 重构出的脉冲 A 强度包络和相位曲线

Fig. 3. Reconstructed intensity and phase curves of pulse A.

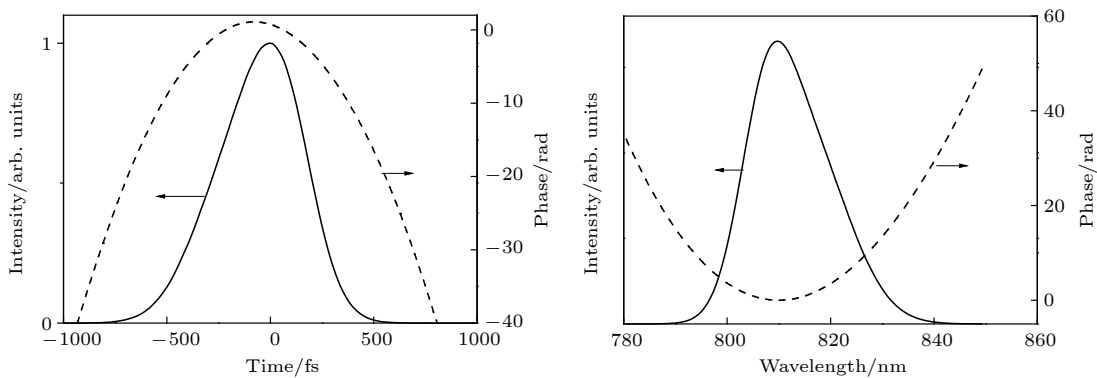


图 4 重构出的脉冲 B 强度包络和相位曲线

Fig. 4. Reconstructed intensity and phase curves of pulse B.

4 结 论

提出了一种快速扫描 FROG 装置, 它在标准 SHG-FROG 装置上利用信号发生器输出正弦信号同步驱动音圈电机和扫描振镜, 从而利用面阵相机在半个正弦周期内快速拍摄待测脉冲的 FROG 迹线图. 通常在 1 s 内可以拍摄到 2048×2048 以上的大矩阵. 为了验证该装置的实用性, 我们测量了

自锁模钛宝石激光器输出的飞秒脉冲被 200 mm 厚 BK7 玻璃块展宽前后的形状变化, 脉冲重构的准确性也得到证实. 要进一步提高系统的测量准确度, 宜利用具有位置编码定位功能的音圈电机, 用于延时扫描的实时监控以及延时非线性的修正. 另外, 对于大矩阵 FROG 谱图的脉冲重构, 除了要快速拍摄 FROG 谱图之外还需对通用 FROG 脉冲重构算法做进一步的优化提速, 才能快捷地获得脉冲重构的结果. 相关研究工作正在进行中.

参考文献

- [1] Zhang S N, Zhu W H, Li J G, Jin Z M, Dai Y, Zhang Z Z, Ma G H, Yao J Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 197202 (in Chinese) [张顺浓, 朱伟骅, 李炬赓, 金钻明, 戴晔, 张宗芝, 马国宏, 姚建铨 2018 物理学报 **67** 197202]
- [2] Li M, Wang Z H, Teng H, He X K, Han H N, Li D H, Wei Z Y, Szymon S 2018 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **48** 024201 (in Chinese) [李铭, 王兆华, 滕浩, 贺新奎, 韩海年, 李德华, 魏志义, Szymon S 2018 中国科学: 物理学 力学 天文学 **48** 024201]
- [3] Peng B, Qu X H, Zhang F M, Zhang T Y, Zhang T L, Liu X X, Xie Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 210601 (in Chinese) [彭博, 曲兴华, 张福民, 张天宇, 张铁犁, 刘晓旭, 谢阳 2018 物理学报 **67** 210601]
- [4] Zewail A H 2000 *J. Phys. Chem. A* **104** 5660
- [5] Kane D J, Trebino R 1993 *Opt. Lett.* **18** 823
- [6] Huang P, Fang S B, Huang H D, Zhao K, Teng H, Hou X, Wei Z Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 214202 (in Chinese) [黄沛, 方少波, 黄杭东, 赵昆, 滕浩, 侯洵, 魏志义 2018 物理学报 **67** 214202]
- [7] Stibenz G, Steinmeyer G 2005 *Opt. Express* **13** 2617
- [8] Wang Z H, Wei Z Y, Teng H, Wang P, Zhang J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 362 (in Chinese) [王兆华, 魏志义, 滕浩, 王鹏, 张杰 2003 物理学报 **52** 362]
- [9] Marceau C, Thomas S, Kassim Y, Gingras G, Witzell B 2015 *Appl. Phys. B* **119** 339
- [10] Hause A, Kraf S, Rohrmann P, Mitschke F 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 868
- [11] Ma X L, Li P L, Guo H L, Zhang Y, Zhu T Y, Cao F J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240601 (in Chinese) [马晓璐, 李培丽, 郭海莉, 张一, 朱天阳, 曹凤娇 2014 物理学报 **63** 240601]
- [12] Palaniyappan S, Shah R C, Johnson R, Shimada T, Gautier D C, Letzring S, Jung D, Hrllein R, Offermann D T, Fernandez J C, Hegelich B M 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E103
- [13] Palaniyappan S, Hegelich B M, Wu H C, Jung D, Gautier D C, Yin L, Albright B J, Johnson R P, Shimada T, Letzring S, Offermann D T, Ren J, Huang C K, Hörlein R, Dromey B, Fernandez J C, Shah R C 2012 *Nat. Phys.* **8** 63
- [14] O'Shea P, Kimmel M, Gu X, Trebino R 2001 *Opt. Lett.* **26** 932
- [15] Cohen J, Lee D, Chauhan V, Vaughan P, Trebino R 2010 *Opt. Express* **18** 17484
- [16] Yasa Z A, Amer N M 1981 *Opt. Commun.* **36** 406
- [17] Kalpaxis A, Doukas A G, Budansky Y, Rosen D L, Katz A, Alfano R R 1982 *Rev. Sci. Instrum.* **53** 960
- [18] Riffe D M, Sabbah A J 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 3099
- [19] Zhang W L, Cai L, Dai J M, Chen Y, Bian Z P, Zheng X M, Xing Q R, Wang Q Y 1997 *Chin. J. Laser* **24** 915 (in Chinese) [张伟力, 柴路, 戴建明, 陈野, 边自鹏, 郑学梅, 邢岐荣, 王清月 1997 中国激光 **24** 915]
- [20] Kane D J 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** A120

Measurement of ultrashort laser pulses with rapid-scanning frequency-resolved optical gating device*

Wen Jin-Hui[†] Hu Ting Wu Qin-Fei

(School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 7 January 2019; revised manuscript received 6 March 2019)

Abstract

Frequency-resolved optical gating (FROG) is now one of the main methods of characterizing the ultrashort laser pulses. There are mainly three SHG-FROG methods, i.e. the standard FROG, the single-shot FROG and GRENOUILLE, each of which has its own features and application areas. Although the standard SHG-FROG has balanced advantages in sensitivity, accuracy and applicability for various test pulses, its speed is much slower than the others': it often takes a few seconds or even minutes to record the FROG trace, which is dependent on the size of FROG image. Nowadays continuous development of the technique of digital imaging brings to high resolution CCD/CMOS image cameras with tens of millions pixels and fast refreshing rate. Unfortunately the standard FROG cannot make use of these image cameras for the real-time measurement of ultrashort pulses. To solve this problem, in this paper a rapid-scanning FROG device based on the standard SHG-FROG is demonstrated, where sinusoidal waves from a signal generator synchronously drive a voice coil actuator and a galvo-scanner, so that the spectra of the autocorrelation at different delays are successively reflected onto an area camera. As long as the camera is triggered to shoot continuously, the entire FROG trace can be recorded quickly within 1 s. Furthermore, several guidelines for good performance with this device are provided, including the settings of the amplitude and frequency of the driving sinusoidal waves, the selections of the focuses of the collimating lens F_1 and the focusing lens F_2 , and the method of delay calibration. This device is suitable for the real-time measurement of ultrashort pulses with large chirps or complex structures where large-size FROG images need to be captured. In order to show the capability of this device, femtosecond pulses delivered directly from a home-made Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser as well as the chirp pulses dispersed by a 200 mm-thick BK7 slab are measured. Two scan ranges are selected in order to achieve enough effective data points in the FROG traces of these two test pulses. Using standard procedure of pulse retrieval of FROG, the two pulses are reconstructed with pulse widths 58 fs and 492 fs, respectively. From the retrieved spectral phases of these test pulses, the GDD value of the BK7 slab can be deduced to be 8740 fs², which is in good agreement with the theoretical value of 8815 fs². Thus the experimental results confirm the accuracy and applicability of this FROG device.

Keywords: frequency-resolved optical gating, ultrashort pulse, real time measurement, rapid-scanning

PACS: 06.60.Jn, 07.60.-j, 42.30.Rx, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.68.20190034

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11534017) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575223).

[†] Corresponding author. E-mail: wenjh@mail.sysu.edu.cn