

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

黄沛 方少波 黄杭东 赵昆 滕浩 侯洵 魏志义

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

Huang Pei Fang Shao-Bo Huang Hang-Dong Zhao Kun Teng Hao Hou Xun Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 214202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181570

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181570>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干光束经过湍流大气传输研究进展

Research progress of partially coherent beams propagation in turbulent atmosphere

物理学报.2018, 67(18): 184203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180877>

激光光强扰动对相干场成像降质影响理论研究

Theoretical research of influence of laser intensity fluctuation on imaging quality degradation of coherent field

物理学报.2017, 66(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244202>

具有余弦-高斯关联结构函数部分相干贝塞尔-高斯光束的传输性质及四暗空心光束的产生

Propagation properties of nonuniform cosine-Gaussian correlated Bessel-Gaussian beam through paraxial ABCD system and generation of dark-hollow beam array

物理学报.2017, 66(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164202>

基于谱域相位分辨光学相干层析的纳米级表面形貌成像

Nanoscale surface topography imaging using phase-resolved spectral domain optical coherence tomography

物理学报.2017, 66(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154202>

部分相干径向偏振光束传输中相干性研究

Research on the coherence of partially coherent radially polarized beam during propagation

物理学报.2015, 64(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134201>

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*

黄沛¹⁾²⁾³⁾ 方少波^{2)†} 黄杭东²⁾ 赵昆²⁾ 滕浩²⁾ 侯洵¹⁾ 魏志义^{2)3)‡}

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2018年8月21日收到; 2018年8月31日收到修改稿)

操控多路激光脉冲之间的相对延时(相对相位)对于亚周期相干合成技术意义重大. 当周期量级脉冲之间的相对延时接近数十飞秒时, 常见的飞秒脉冲测量手段已无法满足脉冲之间相对相位的精确调控需求. 本文基于瞬态光栅频率分辨光学开关装置, 精确反演出脉冲之间的相对相位. 此方案不仅有助于直接产生亚周期(亚飞秒)脉冲, 还可应用于时间隐身学和二维相干光谱学等相关领域.

关键词: 亚周期脉冲, 相干合成, 相对延时, 飞秒脉冲测量

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.65.Re, 78.47.jj

DOI: 10.7498/aps.67.20181570

1 引言

优化多束激光脉冲合束后的时域重合是开展亚周期光场相干合成^[1-4]、光参量(啁啾脉冲)放大^[5-7]、多色场驱动高次谐波^[8-11]等众多超快激光前沿研究的关键技术之一. 当两束激光脉冲之间的相对延迟(相对相位)接近数十飞秒时, 基于具有皮秒(亚皮秒)精度的高速光电探测器的脉冲测量装置难以准确描述两束脉冲之间数十飞秒量级的相对延迟(相对相位), 甚至无法确定两束脉冲之间的前后关系. 特别是当具有不同独立光谱成分(光谱无重合成分)的各脉冲满足时空重合条件时, 也无法在空间上与光谱上产生干涉条纹. 为了锁定脉冲之间的相对延迟, 通常利用和频、差频、光参量技术等非线性效应来精确测量(反演)脉冲之间的

相对延时(相对相位). 如利用非线性晶体将原有脉冲光谱进一步展宽到足以产生重合部分^[12], 根据光谱干涉反演推算出脉冲之间的相对延迟(相对相位). 近年来, 平衡光学互相关^[13-15]方案则是利用两束脉冲产生的和频效应, 通过和频光强度与两脉冲相对相位之间极其灵敏的对应关系, 以镜像互相关光路中的和频光强度为参考, 再利用平衡放大光电探测器消除每个脉冲自身强度噪声对和频光强度的干扰, 最终将脉冲之间的相对延时(相对相位)测量精度提高到了阿秒量级^[13]. 然而, 上述方案都无法准确描述各脉冲之间的前后关系. 由于受到非线性晶体透过率和其相位匹配条件的约束, 之前报道的许多方案对于被测量脉冲的光谱范围都有相对严格的限制. 本文提出的基于瞬态光栅频率分辨光学开关(transient-grating frequency-resolved optical gating, TG-FROG)装置^[16]不仅可以实现

* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFC0110301)、国家自然科学基金(批准号: 61575219)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(批准号: XDB23030230)、中国科学院前沿科学重点研究计划(批准号: YZDJ-SSW-JSC00)和中国科学院青年创新促进会(批准号: 2018007)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shaobo.fang@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

周期量级飞秒脉冲时域宽度(绝对相位)的测量,还能准确描述合束脉冲之间的相对延迟(相对相位)和其前后位置关系. 由于TG-FROG装置是基于无需参考光的自衍射原理,其波长适用范围远优于其他测量方案.

2 实验装置及原理

FROG技术是在自相关法的基础上,将得到的自相关信号进行频率分辨,利用反迭代算法进行数据处理,最终得到脉冲电场与光谱形状以及相位等信息.其基本过程是将脉冲激光分为两部分,一部分作为待测光,另一部分作为开关光,将开关光与待测光聚焦到非线性晶体中产生相互作用得到信号光,通过扫描开关光的时间延时,对每个延时点的信号光进行光谱分辨测量,得到每个延时点的光强信息,按延时整合成FROG追迹图,再利用反迭代算法,来获得脉宽、相位等信息.由于产生信号光的非线性过程不一致,所以FROG也被细分为偏振光开关法、二次谐波法、自衍射法、三次谐波法以及瞬态光栅法等.

TG-FROG的原理如图1所示.待测激光被分为三束,其中两束利用三阶非线性效应在光学介质上形成稳定的瞬态光栅,第三束被此光栅衍射后产生多个信号光,选取其中满足相位匹配的一束作为信号光.实际光路中利用一片双D镜(一半固定,一半由压电陶瓷(PZT)驱动产生延迟扫描)和一个三孔光阑将入射光分成三束后在聚焦到三阶非线性介质(本文使用的是50 μm的熔融石英片)中产生第四束信号光.利用光谱仪对双D镜延迟扫描过程中产生的一系列信号光进行光谱分辨,按延时时间拟合光谱得到FROG追迹图,最后利用FROG迭代算法反演得到原始脉冲的电场相位以及光谱相位信息.

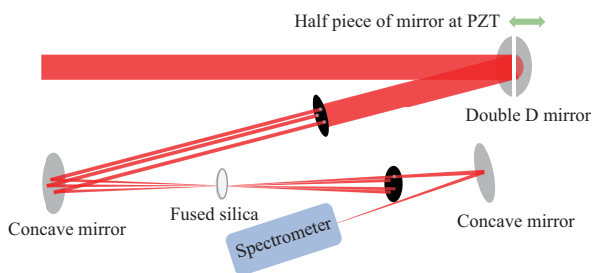


图1 TG-FROG装置原理图

Fig. 1. Schematic representation of a TG-FROG system.

FROG的基础反迭代算法在原理上一致,只是由于产生信号光的非线性过程不一致,所以在具体反演时的约束条件不同,FROG反迭代算法流程图如图2所示.待测光在时域上可写为

$$E(t) = \text{Re}\{\sqrt{I(t)} \exp[i\omega_0 t - i\varphi(t)]\}. \quad (1)$$

再将开关光函数定义为 $g(t - \tau)$,不同类型FROG的开关光函数不一样.待测光与开关光相互作用后产生的信号光在时域上可表示为

$$A(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau)dt. \quad (2)$$

将其进行傅里叶变换到频域上的表达式为

$$S(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t)g(t - \tau) \exp(-i\omega t)dt \right|^2. \quad (3)$$

利用(2)与(3)式作为两个约束条件来进行反迭代,不同类型的FROG装置的开关光函数不一致.在TG-FROG中开关光为三束光干涉叠加,函数表达式可写为 $g(t - \tau) = E_1(t)E_2^*(t - \tau)E_3(t)$,由于三束光参数相同,可将开关光函数简写为 $g(t - \tau) = E(t)^2 E^*(t - \tau)$.最终得到信号光在频域上的表达式为

$$S(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t)^3 E^*(t - \tau) \exp(-i\omega t)dt \right|^2. \quad (4)$$

利用(2)与(4)式作为约束条件来进行反迭代,基本原理是先假定一个初始的脉冲电场 $E(t)$,通常使用高斯脉冲,代入约束条件(2)式得到一个初始的信号场,再将信号场代入约束条件(4)式得到初始光谱强度分布,将计算得到的光谱强度分布与实验测量得到的光谱强度追迹图进行比较,修改计算得到新的光谱强度分布.再将修改得到的光谱进行逆傅里叶变换得到一个新的脉冲电场,其中逆傅里叶变换得到的实部为电场强度,虚部为电场相位,得到新的脉冲电场便完成第一次迭代.再将第一次迭代得到的电场重复上述步骤进行多次迭代,当计算得到的光谱强度分布与实验测量得到的光谱强度分布之间的均方根误差很小(10^{-3})时,最终可以得到与实际脉冲形状十分接近的电场.本文利用TG-FROG追迹图直接反演脉冲的相对延时(相对相位),由于其信号光来自于瞬态光栅的自衍射,所以其波长适用范围远优于其他FROG测量方案^[17].本实验通过反迭代得到脉冲的电场形状,其中包括两个脉冲电场包络之间的相对位置,相对位置的距离便是脉冲之间的相对延时(相对

相位). 由 TG-FROG 追迹图可以得到光谱信息, 长波部分与短波部分覆盖的波长范围不同, 通过光谱范围可判断对应的电场, 即判断两束脉冲对应的电场包络的前后位置关系.

本实验中的驱动光源是 kHz 钛宝石飞秒激光放大器, 通过充气空心光纤展宽后产生超连续光谱 (500—950 nm). 将超连续激光入射双色干涉仪, 利用双色分束镜反射短波光谱成分 (500—700 nm),

同时透射长波部分 (700—950 nm). 通过两套啁啾镜对与尖劈对组合将长波和短波部分脉冲分别独立压缩后获得 6.7 fs (短波部分) 和 9.8 fs (长波部分) 两束周期量级飞秒脉冲. 最后利用 TG-FROG 装置测量合束后的两束脉冲的相对延时 (相对相位). 双色干涉仪实验装置示意图如图 3 所示, 当两束脉冲在时间上重合时, 得到的脉冲电场只有一个包络. 此时两束脉冲之间相对延时 $\Delta t = 0$,

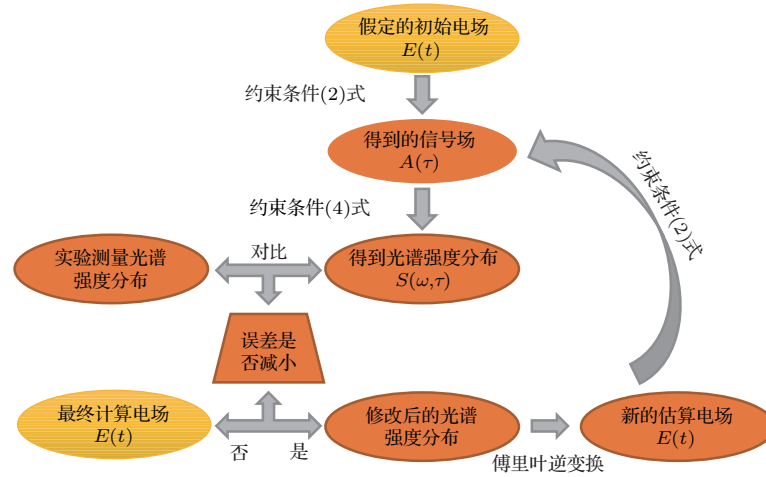


图 2 FROG 迭代算法流程图

Fig. 2. Diagram representation of FROG iterative algorithm.

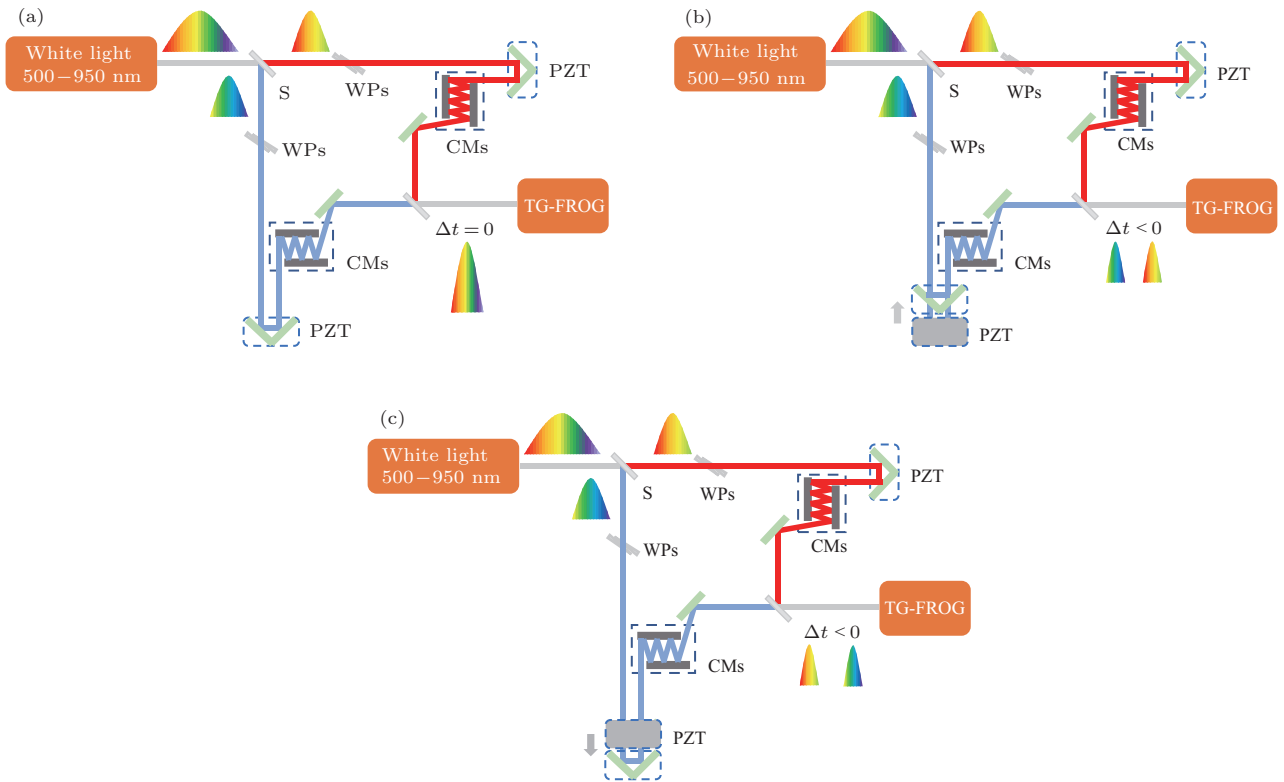


图 3 双色干涉仪示意图 (S, 双色镜; WPs, 尖劈对; CMs, 啁啾镜组; PZT, 压电陶瓷平移台)

Fig. 3. Schematic representation of a two-color interferometer. S, dichroic mirror; WPs, wedges; CMs, chirped mirrors; PZT: piezo-transducer.

如图3(a)所示. 进一步利用PZT 精密调节短波长光路的光程, 使短波长脉冲在后, 即相对延时 $\Delta t < 0$, 如图3(b)所示. 同样利用PZT增加短波

长光路的光程, 使短波长脉冲靠前, 即相对延时 $\Delta t > 0$, 如图3(b)所示. TG-FROG测量结果如图4所示.

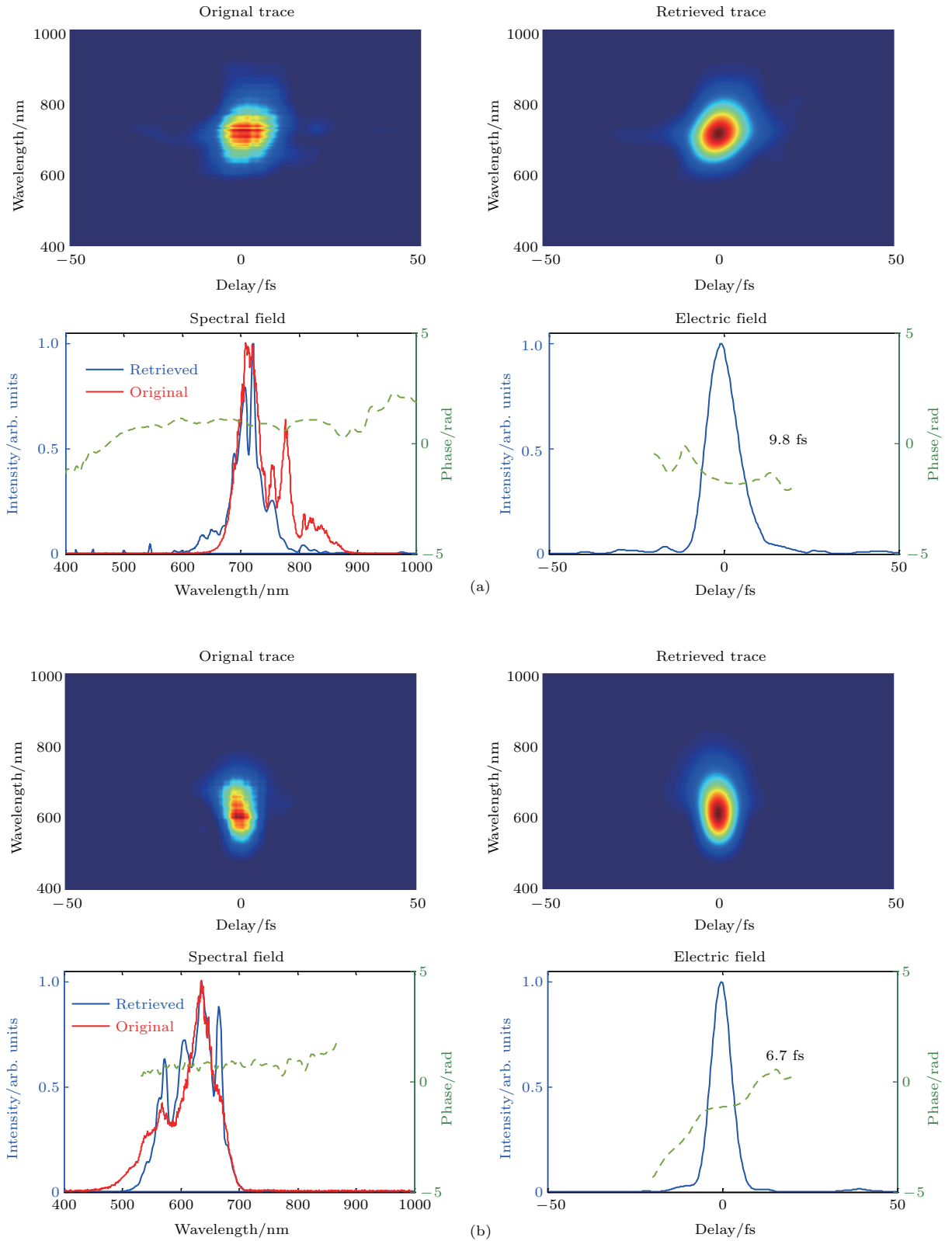


图4 TG-FROG测量结果 (a)长波脉宽9.8 fs; (b)短波脉宽6.7 fs

Fig. 4. TG-FROG measurement for longer wavelength pulse duration 9.8 fs (a) and shorter wavelength pulse duration 6.7 fs (b).

3 测量结果

本实验通过改变干涉仪中短波光路延迟线(PZT)来调节两路脉冲之间的相对延迟($\Delta\tau$). 当两束脉冲完全重合时(图5(b)所示), 由TG-FROG反演测量得到的电场强度包络只有一个, 此时两束脉冲之间无相对延迟($\Delta\tau = 0$). 以此为零点, 继续改变PZT的位移量(L), 对应的 $\Delta\tau = 2L/C$, C 为光速. 当两束脉冲相对超过百飞秒量级时, 如 $L = -17 \mu\text{m}$, 对应的 $\Delta\tau = -113.33 \text{ fs}$. 此时的

FROG实际测量值为 -113.00 fs , 如图5(a)所示, 两者相差 0.33 fs . 为了显著区分两个脉冲的前后关系, 实验中短波部分的信号光强度远低于长波部分的信号光强度. 反向改变PZT的位移量 $L = 10 \mu\text{m}$ 时, 对应的 $\Delta\tau = 66.67 \text{ fs}$, 此时的FROG实际测量值为 66.90 fs , 如图5(e)所示, 两者相差 0.23 fs . 进一步减少 L 至两脉冲部分重合时, 如 $L = 3 \mu\text{m}$ 与 $L = 4 \mu\text{m}$, FROG实际测量值如图5(c)和图5(d)所示, $\Delta\tau$ 分别为 20.00 fs 与 26.70 fs . 实验测量值均和所对应的 $\Delta\tau$ 高度符合(如表1所列).

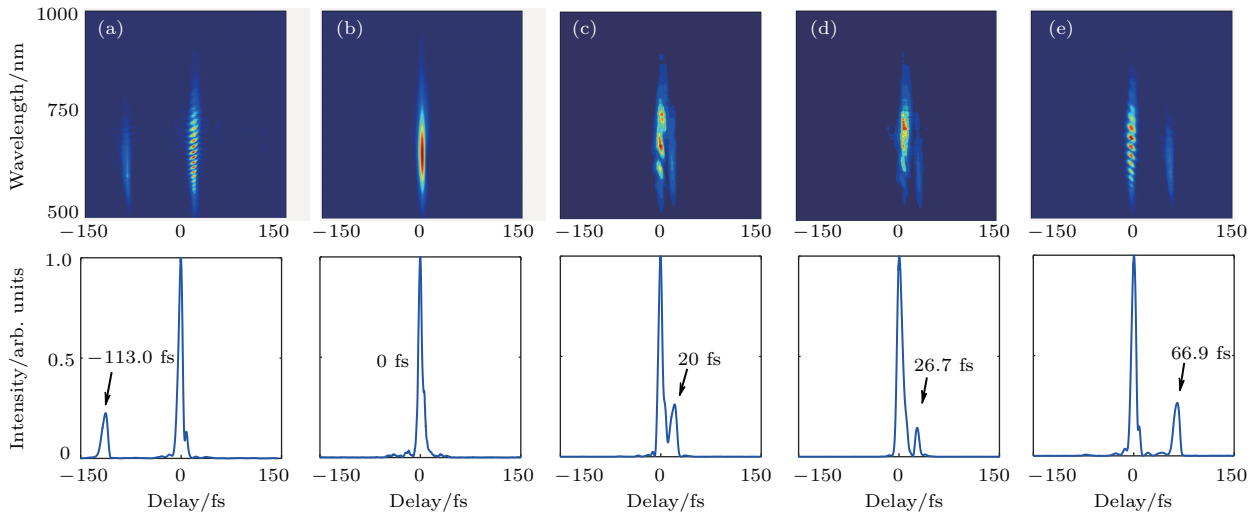


图5 TG-FROG 追迹图以及反演的电场包络信息

Fig. 5. Trace and temporal intensity of pulses retrieved by TG-FROG.

表1 实验结果对比

Table 1. Comparison of experimental results.

$L/\mu\text{m}$	$\Delta\tau/\text{fs}$	FROG 测量值/fs
-17.00	-113.33	-113.0
-5.21	-34.73	-34.3
-2.94	-19.60	-19.3
3.00	19.98	20.0
4.00	26.67	26.7
7.02	46.80	46.7
10.00	66.67	66.9

当 L 小于两脉冲各自宽度之和时, 由于两个脉冲包络重合部分较多, 仅仅依靠FROG反演追迹图已经难以区分两脉冲各自对应的电场强度包络. 因此本方案中 $\Delta\tau$ 的有效测量范围应大于两脉冲各自时域脉冲宽度之和. 本实验中选用

的高精度PZT型号为德国PI公司的P-620.1CD-Linearity, 其闭/开环位移量分辨率精度分别优于 $0.2/0.1 \text{ nm}$, 即 $\Delta\tau$ 分辨率精度优于 2 as . 因此, 由PZT位移量不确定度所带来的误差远小于TG-FROG测量装置本省的测量误差.

4 结 论

本文提出了基于TG-FROG装置来测量多路激光脉冲之间的相对延时(相对相位)的方案. 实验中将接近倍频程的超连续光谱分束后分别独立压缩到 6.7 和 9.8 fs 时, 通过TG-FROG装置测量两束脉冲之间的相对延迟, 其测量结果和通过PZT位移量所对应的设定延迟量高度符合. 此方案可快速准确地测量两束脉冲的相对延迟和前后位置关系(测量范围涵盖十几飞秒至十几皮秒之间, 测量精度达到亚飞秒量级), 特别适用于具有不同光谱成

分的脉冲合束(如和频、差频、光参量等). 此方案不仅可以推广到其他基于瞬态光栅的超快脉冲测量技术^[18], 在亚周期脉冲相干合成、光场调控、二维相干光谱学^[19]和时间隐身学^[20]等相关领域都具有潜在的应用前景.

参考文献

- [1] Hassan M T, Luu T T, Moulet A, Raskazovskaya O, Zhokhov P, Garg M, Karpowicz N, Zheltikov A M, Pervak V, Krausz F, Goulielmakis E 2016 *Nature* **530** 66
- [2] Huang S W, Cirmi G, Moses J, Hong K H, Bhardwaj S, Birge J R, Chen L J, Li E, Eggleton B J, Cerullo G, Kartner F X 2011 *Nat. Photon.* **5** 475
- [3] Manzoni C, Mucke O D, Cirmi G, Fang S, Moses J, Huang S W, Hong K H, Cerullo G, Kartner F X 2015 *Laser Photon. Rev.* **9** 129
- [4] Mucke O D, Fang S B, Cirmi G, Maria Rossi G, Chia S H, Ye H, Yang Y D, Mainz R, Manzoni C, Farinello P, Cerullo G, Kartner F X 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Electron.* **21** 8700712
- [5] Fang S, Cirmi G, Chia S, Mucke O D, Kärtner F X, Manzoni C, Farinello P, Cerullo G 2013 *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (OSA) Kyoto, Japan, June 30–July 4, 2013* pWB3_1
- [6] Schmid B E, Thire N, Boivin M, Laramée A, Poitras F, Lebrun G, Ozaki T, Ibrahim H, Legare F 2014 *Nat. Commun.* **5** 3643
- [7] Krogen P, Suchowski H, Liang H, Flemens N, Hong K H, Kärtner F X, Moses J 2017 *Nat. Photon.* **11** 222
- [8] Fang S, Tanigawa T, Ishikawa K L, Karasawa N, Yamashita M 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1
- [9] Wei P F, Miao J, Zeng Z N, Li C, Ge X C, Li R X, Xu Z Z 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 233903
- [10] Takahashi E J, Lan P, Mucke O D, Nabekawa Y, Midorikawa K 2013 *Nat. Commun.* **4** 2691
- [11] Jin C, Wang G, Wei H, Le A T, Lin C D 2014 *Nat. Commun.* **5** 4003
- [12] Hassan M T, Wirth A, Grguras I, Moulet A, Luu T T, Gagnon J, Pervak V, Goulielmakis E 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 111301
- [13] Schibli T R, Kim J, Kuzucu O, Gopinath J T, Tandon S N, Petrich G S, Kolodziejewski L A, Fujimoto J G, Ippen E P, Kaertner F X 2003 *Opt. Lett.* **28** 947
- [14] Manzoni C, Huang S W, Cirmi G, Farinello P, Moses J, Kärtner F X, Cerullo G 2012 *Opt. Lett.* **37** 1880
- [15] Fang S, Mainz R, Rossi G M, Yang Y, Cirmi G, Chia S, Manzoni C, Cerullo G, Mucke O D, Kartner F X 2015 *European Conference on Lasers and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference Munich, Germany, June 21–25, 2015* pCG_P_4
- [16] Sweetser J N, Fittinghoff D N, Trebino R 1997 *Opt. Lett.* **22** 519
- [17] Trebino R, DeLong K W, Fittinghoff D N, Sweetser J N, Krumbugel M A, Richman B A 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3277
- [18] Liu J, Li F J, Jiang Y L, Li C, Leng Y X, Kobayashi T, Li R X, Xu Z Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 4829
- [19] Zhu W D, Wang R, Zhang C F, Wang G D, Liu Y L, Zhao W, Dai X C, Wang X Y, Cerullo G, Cundiff S, Xiao M 2017 *Opt. Express* **25** 21115
- [20] Fridman M, Farsi A, Okawachi Y, Gaeta A L 2012 *Nature* **481** 62

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

Huang Pei¹⁾²⁾³⁾ Fang Shao-Bo^{2)†} Huang Hang-Dong²⁾ Zhao Kun²⁾ Teng Hao²⁾
Hou Xun¹⁾ Wei Zhi-Yi^{2)3)‡}

1) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 21 August 2018; revised manuscript received 31 August 2018)

Abstract

The accurate and precise controlling of the attosecond time delay between the sub-pulses within a hundredth of an optical cycle is the key ingredient for the sophisticated custom-tailored coherent waveform synthesizer. The attosecond delay control technique commonly experiences the “complete” characterization of the ultrashort sub-cycle pulses, which includes the spatiotemporal pulse characterization of the synthesized waveform and the attosecond relative delay between the parent pulses. In this work, the relative time delay between spectrally separated ultrashort parent pulses is characterized in an interferometer scheme with a background-free transient-grating frequency-resolved optical grating (TG-FROG). The TG-FROG geometry accurately measures the full time-dependent intensity and phase of ultrashort laser pulses in a wide range of regime (from ultraviolet to infrared) and offers significant advantages over other nonlinear-optical processes geometries (i.e., the polarization-gate-FROG, the self-diffraction-FROG, the second-harmonic generation-FROG and the third-harmonic-generation-FROG). The attosecond measurement accuracy is achieved for the first time, to the best of our knowledge. In this experiment, the output of a carrier-envelope-phase-stable Ti:sapphire amplifier (sub-30-fs, over-1-mJ, 1 kHz) is spectrally broadened in a neon-filled hollow-core fiber with an inner diameter of 250 μm . The transmission through the pressure-gradient hollow-core fiber results in an mJ-level octave-spanning white-light supercontinuum, supporting a sub-3-fs Fourier transform-limited pulse. The supercontinuum is spectrally divided into two parent pulses by using a dichroic mirror. The sub-pulses are individually compressed by the custom-designed double-chirped mirrors and wedge pairs. The short and long wavelength pulses are separately compressed in few-cycle regime, yielding pulses with 6.7 fs and 9.8 fs, respectively. This technique overcomes the bottlenecks in the traditional delay measurement and should be applicable for many ultra-broadband pulse characterizations with extremely simple and alignment-free delay control device used. Furthermore, this new method will be easily adapted for the ultra-broadband two-dimensional electronic spectroscopy, the advanced temporal cloaking, and the field of sub-cycle arbitrary coherent waveform synthesizer for controlling strong-field interactions in atoms, molecules, solids, and nanostructures. We foresee that in the near future this novel technology will be very attractive for various applications in the next-generation light sources such as the Synergetic Extreme Condition User Facility in Beijing, China.

Keywords: sub-cycle waveform, coherent synthesis, relative delay, transient-grating frequency-resolved optical grating

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.65.Re, 78.47.jj

DOI: 10.7498/aps.67.20181570

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFC0110301), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575219), the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB23030230), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant No. YZDJ-SSW-JSC006), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2018007).

† Corresponding author. E-mail: shaobo.fang@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn