

文章编号: 0258-7025(2010)07-1827-05

# 复制脉冲对的时间延迟对光谱相位相干直接 电场重建法测量飞秒脉冲的影响

曹士英<sup>1</sup> 邓玉强<sup>1\*</sup> 孙青<sup>1</sup> 于靖<sup>1</sup> 张志刚<sup>2</sup> 王清月<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量科学研究院, 北京 100013; <sup>2</sup> 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

<sup>3</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

**摘要** 光谱相位相干直接电场重建法 (SPIDER) 是测量飞秒脉冲激光参数快速而准确的方法。通过实验研究了 SPIDER 方法在实际测量时, 两复制脉冲对的不同时间延迟对还原光谱相位和重建脉冲时域波形的影响。实验表明, 时间延迟在 0.22~1.82 ps 范围内变化时, 重建的脉冲时域宽度最大相对标准偏差小于 2.76%。证明了光谱相位可以在较宽的时间延迟范围内得到精确的还原结果, 降低了对光谱仪分辨率的要求, 也简化了寻找最佳时间延迟的实验调试过程。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光测量; 光谱干涉; 相位还原

**中图分类号** T248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1827

## Effects of Replicas Separation on Measurement of Femtosecond Optical Pulses with SPIDER

Cao Shiying<sup>1</sup> Deng Yuqiang<sup>1</sup> Sun Qing<sup>1</sup> Yu Jing<sup>1</sup> Zhang Zhigang<sup>2</sup> Wang Qingyue<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

<sup>2</sup> School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

<sup>3</sup> School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction (SPIDER), as a fast and accurate technique, is usually used in spectral phase measurement of femtosecond optical pulses. The effects of pulse replicas separation on the spectral phase retrieval of femtosecond optical pulses are investigated by experiments. The results show that the difference of reconstructed pulse width (FWHM) is within 2.76% in the replicas separation range from 0.22 to 1.82 ps. This research proves that spectral phases can be precisely retrieved in a broad range of pulse replica separation, which reduces the demand of high resolution spectrometer and facilitates the optimal parameter of pulse replicas separation in experimental measurement.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond pulse measurement; spectral interferometry; phase retrieval

## 1 引 言

伴随超短脉冲技术的飞速发展, 目前人们从激光振荡器中可以直接获得小于两个光学周期的飞秒脉冲; 而利用光谱展宽和时域压缩技术, 在可见光波段

脉冲的宽度已接近一个光学周期。当脉冲宽度达到周期量级时, 脉冲的相位信息将不可忽略。尽管采用传统的自相关法<sup>[1]</sup>和光谱仪, 已经可以粗略获得脉冲宽度以及若干相位调制或啁啾的信息, 但它们都无法

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-12-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAF06B05)、中国计量科学研究院科研基金(AKY0748, AKY0904)和中国计量科学研究院博士专项科研启动基金(TGQD05-12)资助课题。

作者简介: 曹士英(1978—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事超短脉冲激光的产生、测量及应用等方面的研究。

E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: yqdeng@nim.ac.cn

描述包括相位特征在内的飞秒脉冲的全部特征。

1998年,美国 Rochester 大学的 Iaconis 等<sup>[2]</sup>提出了光谱相位相干直接电场重构法 (SPIDER) 测量飞秒脉冲的光谱相位。与频率分辨光学开关法 (FROG)<sup>[3]</sup>相比,SPIDER 的最大优点是不需要迭代,拥有极快的测量时间,特别适合于飞秒激光脉冲的实时监测与控制。同时,SPIDER 的高灵敏度特性使其不仅具有测量单脉冲的能力,而且可以测量未经放大的脉冲。因此,SPIDER 越来越多地被应用于超短脉冲的评价,并逐渐成为评价亚 10 fs 光脉冲特征的标准方法之一<sup>[4~6]</sup>。在 SPIDER 实际测量中,三个参数的选取极为重要:脉冲对的时间延迟  $\tau$ ,光谱侧切量  $\Omega$  和展宽器的二阶色散  $\phi$ 。其中  $\tau$  和  $\Omega$  均有各自的限制条件,而且两者通过  $\Omega = -\tau/\phi$  与展宽器色散联系在一起<sup>[7]</sup>。因此,这三个参数互相之间是关联的。在既定的 SPIDER 中二阶色散  $\phi$  保持不变,主要通过复制脉冲对的时间延迟  $\tau$  来改变光谱侧切量  $\Omega$ 。 $\tau$  必须足够大以使产生的干涉图中有适量数目的条纹。另外, $\tau$  必须足够小以使光谱仪或探测阵列能够满足奈奎斯特抽样定理。理论研究表明,当复制脉冲对的时间延迟  $\tau$  在一个较宽的范围内变化时,所对应的重构脉冲宽度相对于原输入脉冲宽度的误差都可以保持一个很小量值,并且在这个较宽的范围内存在一个最佳的脉冲对时间延迟<sup>[8]</sup>。对于脉冲宽度 20 fs 的输入脉冲,当时间延迟在 0.9~2 ps 范围内变化时,所对应的重构脉冲宽度相对于原输入脉冲宽度的误差都小于 3%<sup>[9]</sup>。这说明在 SPIDER 的调试和测量过程中,复制脉冲对的时间延迟  $\tau$  可以在一个范围内变化而不需要局限于某一个特定值。

本文在实验上研究了利用 SPIDER 测量飞秒激光脉冲时,不同时间延迟对光谱相位还原和时域脉冲波形重建的影响。

## 2 实验装置

实验中采用的 SPIDER 为自制的仪器化机型 (SPIDER-CD, NIM), 其内部结构如图 1 所示<sup>[10]</sup>。待测脉冲进入飞秒脉冲相位测量仪,经平面反射镜 M1 反射后首先被分束镜 BS1 分为强度比为 30:70 的两路脉冲 E1 和 E2,其中 E1 一路经 TS1 反射后进入由 TS2, TS3, BS2, BS3 构成的迈克耳孙干涉仪装置分为具有时间延迟  $\tau$  的脉冲对后在 BS3 处合成一路 E3; E2 一路进入固体色散介质 BL 中,经 TS4 反射镜两次经过固体色散介质 BL 展宽为啁啾脉

冲。其中 TS2, TS3 和 TS4 均为由两个直角棱镜组成的反射系统。E2, E3 路光分别经 M2, M3 平面反射镜反射至抛物面镜 PM 上,经抛物面镜 PM 垂直反射后以一定角度聚焦到非线性晶体 CR 上进行频率上转换,CR 为 I 类相位匹配的偏硼酸钡 (BBO) 晶体,晶体厚度为 20  $\mu\text{m}$ 。和频后的信号经耦合系统 DT 耦合进入光纤传输进入光谱仪 (HR4000, Ocean Optics), 在光谱仪中产生光谱相干的干涉条纹。利用计算机采集干涉条纹信息并用 SPIDER 反演算法处理就可以得到入射脉冲的相位。系统中 A1, A2 为定位光阑。

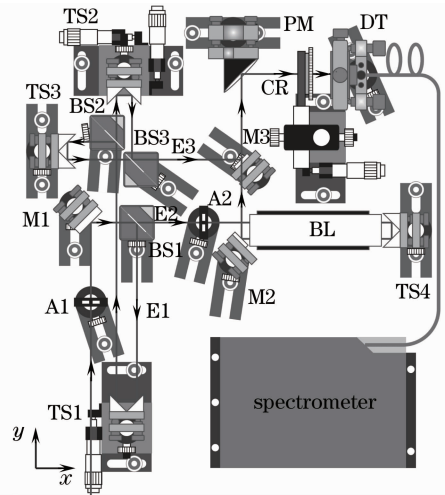


图 1 自制 SPIDER 装置光路图

Fig. 1 Schematic of the home-made SPIDER apparatus

## 3 实验结果及分析

在实验中采用 20  $\mu\text{m}$  厚的 BBO 晶体进行频率转换<sup>[11]</sup>,测量光谱干涉信号,调整 SPIDER 仪器中迈克耳孙干涉仪的两臂长度,使脉冲对具有不同的时间延迟,然后从采集的光谱干涉条纹中通过小波变换方法来还原光谱相位<sup>[12~15]</sup>,研究不同时间延迟对光谱相位还原的影响。

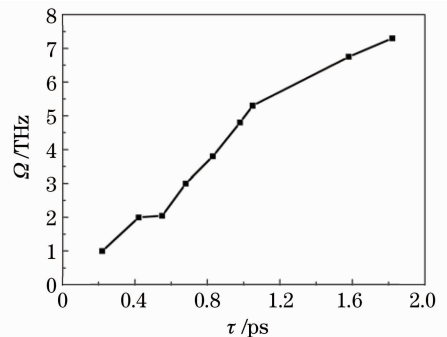


图 2 不同时间延迟所对应的光谱侧切量

Fig. 2 Spectral shear at different time delays

调节复制脉冲对的时间延迟,从出现光谱干涉条纹开始,用光谱仪采集光谱干涉条纹,直至条纹密度过大,超过光谱仪的分辨能力为止,此时脉冲对时间延迟的变化从 0.22 ps 增大至 1.82 ps。当脉冲对的时间延迟在 0.22 ps 至 1.82 ps 的范围内变化

时,实验测得相应的光谱侧切量变化从 1.0 THz 至 7.3 THz,光谱侧切量随脉冲对延时的变化曲线如图 2 所示。随着延时的增加,光谱侧切量成线性变化,这也符合  $\tau$  和  $\Omega$  的线性关系。通过对不同点上利用  $\tau$  和  $\Omega$  的关系计算取平均可以获取 SPIDER 中色

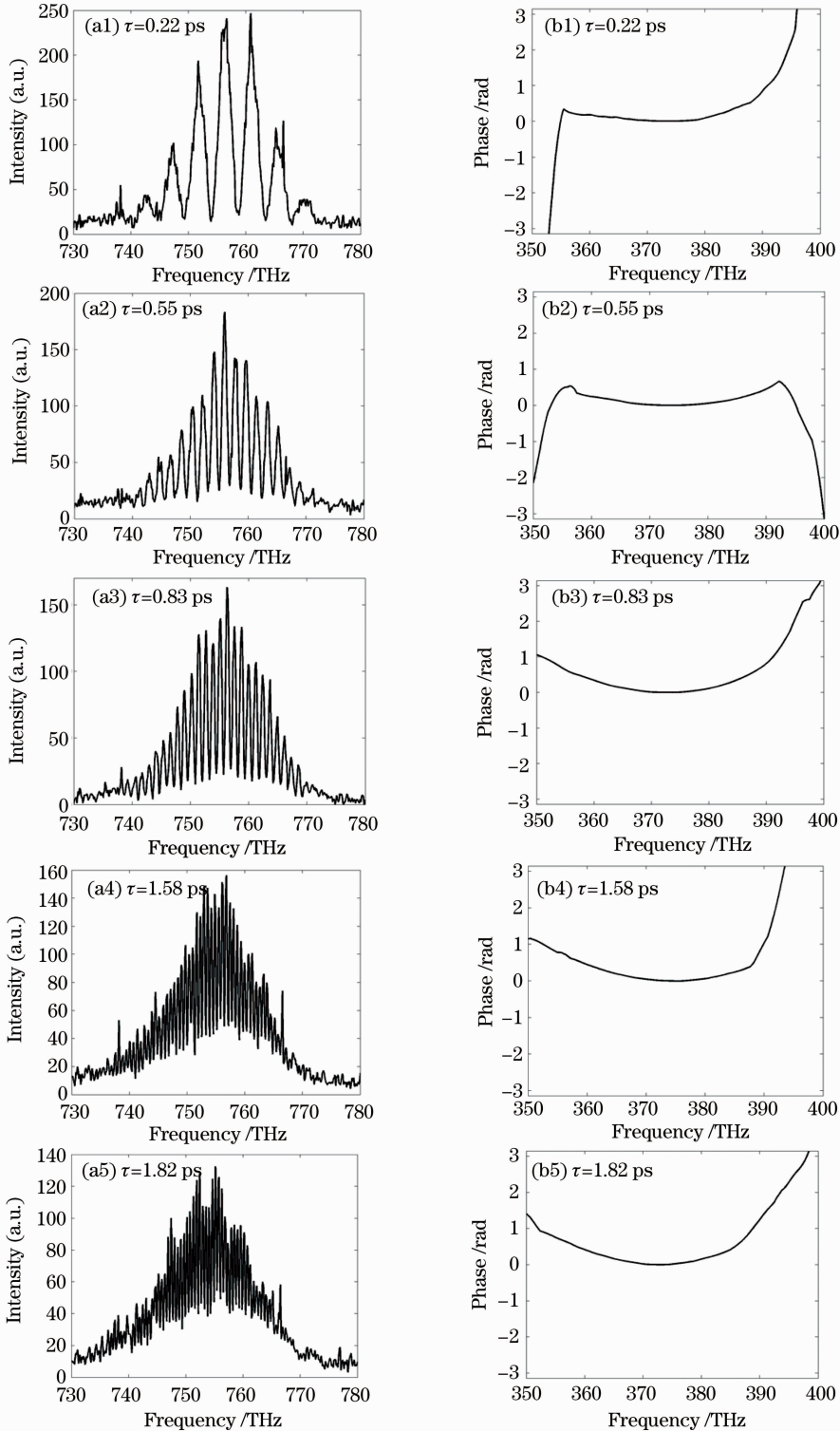


图 3 (a)不同时间延迟下所测量的光谱干涉条纹;(b)根据所测的光谱干涉条纹还原所获得的光谱相位

Fig. 3 (a) Measured interferogram at different time delays; (b) reconstructed spectral phases from the measured interferogram

散介质的二阶色散为  $17940.74 \text{ fs}^2$ 。由于在实际测量过程中基频光谱的微小抖动加之光谱仪采样,使得光谱侧切量的变化与理论计算值略有偏差。

图 3(a)从上到下分别给出了脉冲对之间的时间延迟为 0.22, 0.55, 0.83, 1.58 和 1.82 ps 时所测量的光谱干涉条纹,图 3(b)从上到下分别给出了脉冲对时间延迟为 0.22, 0.55, 0.83, 1.58 和 1.82 ps 时利用所测量的光谱干涉条纹通过小波变换方法还原所获得的光谱相位。当脉冲对的时间延迟小于 0.22 ps 时,干涉条纹的数量太少,光谱仪几乎采集不到干涉

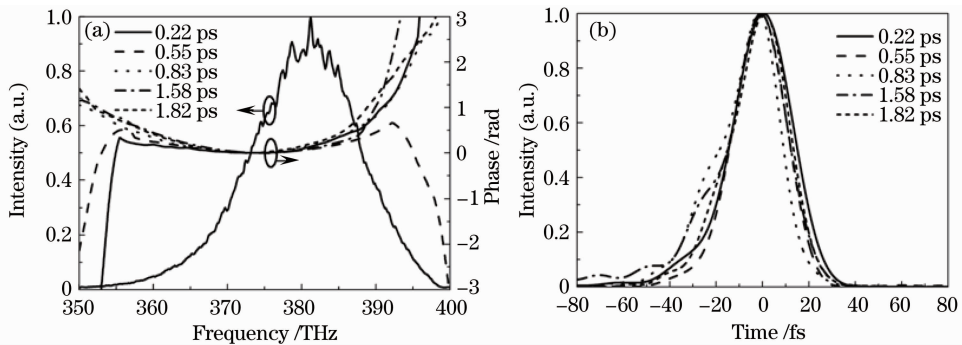


图 4 不同时间延迟光谱干涉还原光谱相位和脉冲波形。(a)光谱和光谱相位;(b)还原后的脉冲波形

Fig. 4 Reconstructed spectral phase and pulse profile at different time delays. (a) spectrum and spectral phase; (b) reconstructed pulse profile

对于还原后的脉冲波形,当时间延时分别为 0.22, 0.42, 0.55, 0.68, 0.83, 0.98, 1.05, 1.58 和 1.82 ps 时,还原的脉冲波形半极大值处的 FWHM 分别为 28.50, 27.30, 27.77, 28.75, 28.47, 26.81, 26.65, 27.60 和 28.03 fs,如图 5 所示,其最大相对标准偏差小于 2.76%,平均值为 27.76 fs。

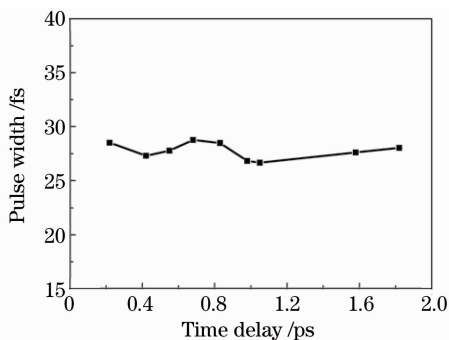


图 5 不同时间延迟所对应的光谱侧切量及还原后的脉冲宽度

Fig. 5 Spectral shear and the pulse width of the reconstructed pulse at different time delays

实验和计算表明,SPIDER 测量方法和小波变换的相位还原算法的有机结合是飞秒脉冲测量中准确而可靠的方法。在测量过程中只要保证光谱仪能

条纹;当脉冲对的时间延迟大于 1.82 ps 时,干涉条纹的密度太大,超出了光谱仪分辨率的限制。

利用不同时间延迟采集的光谱干涉条纹通过小波变换方法还原所获得的光谱相位和脉冲时域形状,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,脉冲对的时间延迟在 0.22 ps 至 1.82 ps 的范围内测得的光谱干涉都可以精确地还原出光谱相位,还原的光谱相位和重建的脉冲时域波形具有很好的一致性。在光谱的半峰全宽(FWHM)范围内,光谱相位还原的相对偏差小于 0.5 rad。

够测得 SPIDER 的光谱干涉信号,小波变换还原 SPIDER 光谱相位就可以从光谱干涉中还原相位和重建脉冲时域波形,并且 SPIDER 测量过程中脉冲对延时对测量结果的影响不大。这为实验中利用 SPIDER 测量飞秒激光脉冲获取脉冲光谱相位和时域波形信息提供了依据。

## 4 结 论

实验研究了利用 SPIDER 测量飞秒激光脉冲时,复制脉冲对的不同时间延迟对光谱相位还原和时域脉冲波形重建的影响。通过采集不同时间延迟的光谱干涉相位信号并利用小波变换方法进行脉冲还原,从光谱干涉条纹出现开始直至条纹密度过大超过光谱仪分辨能力,在这个过程中还原后脉冲宽度的最大相对标准偏差小于 2.76%。说明在允许的误差范围内,用小波变换还原飞秒脉冲光谱相位,还原的脉冲光谱相位对复制脉冲对的时间延迟并不敏感,因此缩短了寻找最佳脉冲时间延迟的调试过程。同时,可通过采取较小的时间延迟提高光谱干涉条纹间隔,以降低利用 SPIDER 测量飞秒脉冲时域参数时对光谱仪高分辨率的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Hao Xin, Zhu Qihua, Wang Xiao *et al.*. Influence of the spatial irregular intensity distribution on the single-shot second-order autocorrelator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1553~1557  
郝欣, 朱启华, 王道等. 空间光强分布不均匀对二阶单次自相关脉宽测量的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1553~1557
- 2 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10): 792~794
- 3 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
- 4 B. Schenkel, J. Biegert, U. Keller. Generation of 3.8 fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1987~1989
- 5 K. Yamane, Z. G. Zhang, K. Okae *et al.*. Optical pulse compression to 3.4 fs in the monocycle region by feedback phase compensation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2258~2260
- 6 L. Gallmann, D. H. Sutter, N. Matuschek *et al.*. Techniques for the characterization of sub-10-fs optical pulses: a comparison [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(1): S67~S75
- 7 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 501~509
- 8 M. E. Anderson, L. E. E. de Araujo, E. M. Kosik *et al.*. The effects of noise on ultrashort-optical-pulse measurement using SPIDER[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(1): S85~S93
- 9 Chai Lu, He Tieying, Yang Shengjie *et al.*. Optimization of the parameters for a SPIDER[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 114~118  
柴路, 何铁英, 杨胜杰等. 光谱位相干涉仪参数的优化选取 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(1): 114~118
- 10 Wu Zubin, Wang Ying, Cao Shiyong *et al.*. Phase measurement of femtosecond laser pulses using improved spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 21~25  
吴祖斌, 王颖, 曹士英等. 用改进的光谱相位相干直接电场重构法装置测量飞秒激光脉冲的相位[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 21~25
- 11 Zheng Liunian, Zhu Jianqiang. Second-harmonic generation errors in characterizing ultrashort pulses with spectral phase interferometry for direct electrical reconstruction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 254~258  
郑留念, 朱健强. 光谱相位相干技术测量飞秒脉冲的倍频误差 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 254~258
- 12 Y. Deng, Z. Wu, L. Chai *et al.*. Wavelet-transform analysis of spectral shearing interferometry for phase reconstruction of femtosecond optical pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2120~2126
- 13 Y. Deng, C. Wang, L. Chai *et al.*. Determination of Gabor wavelet shaping factor for accurate phase retrieval with wavelet-transform [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(8): 1107~1111
- 14 Y. Deng, Z. Wu, S. Cao *et al.*. Spectral phase extraction from spectral shearing interferogram for structured spectrum of femtosecond optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(1): 1~6
- 15 Deng Yuqiang, Wu Zubin, Chen Shenghua *et al.*. Wavelet transform analysis for phase reconstruction of spectral shearing interferometry of ultrashort optical pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3716~3721  
邓玉强, 吴祖斌, 陈盛华等. 自参考光谱相干法的小波变换相位重建 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(8): 3716~3721