

# 无干涉条纹的光谱位相相干直接电场重构法<sup>\*</sup>

雷 亮 文锦辉 焦中兴 寿 倩 吴 羽 刘鲁宁 赖天树 林位株<sup>†</sup>

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2005 年 2 月 23 日收到 2005 年 6 月 8 日收到修改稿)

提出一种新的诊断飞秒脉冲振幅与位相的高精度测量方法. 该方法发展了传统的 SPIDER 方法, 保留了原方法对脉冲信息可以实时、有效和全面地测取的优点, 并能克服其不能测量脉宽较大或位相信息复杂的脉冲的缺点. 在新方法中和频后的脉冲对没有相对延时, 形成无干涉条纹的剪切干涉图. 在调节一个小量延时于某些特定值, 可去掉剪切干涉图的歧义性. 给出数值模拟结果, 证明此方法无需经过傅里叶变换滤波, 可直接由干涉图唯一地提取出脉冲的振幅与位相信息.

关键词: 光谱位相相干直接电场重构法, 飞秒脉冲测量, 超快信息光学

PACC: 4280W, 4260F, 4265K

## 1. 引 言

超快信息光学领域需要全面地测量脉冲的振幅和相位信息<sup>[1-4]</sup>. 迄今为止, 不断进步的超快激光技术已经将可见光和近红外激光脉冲宽度压缩至小于 5 fs<sup>[5]</sup>. 然而随着脉宽的不断缩窄, 激光频谱的带宽不断增大, 其位相结构越来越复杂, 导致对超快脉冲进行实时、有效和全面的信息测取是当前超快激光领域的重要课题<sup>[6]</sup>. 传统的自相关技术只能估算脉冲宽度, 而几种超快脉冲测量方法, 比如频率分辨光学开关法(FROG)<sup>[7, 8]</sup>和光谱位相相干直接电场重构法(SPIDER)<sup>[9, 10]</sup>却具有振幅和相位全信息诊断的能力.

其中 SPIDER 方法是一种快速测量方法, 并具有单脉冲测量特性<sup>[11]</sup>. 然而传统的 SPIDER 方法有其本身固有的缺点. 两个有一定相互延时的脉冲对共线射入非线性晶体并与一个被深度展宽的啁啾脉冲产生和频效应, 形成的剪切干涉图由于双脉冲之间的延时呈梳状结构. 由于梳峰间距狭窄, 必须使用分辨率高的光谱仪测量此频谱图. 为了计算出具有频谱剪切量的脉冲对之间的相对位相差, 需要对频谱图进行傅里叶变换滤波处理, 然而较大的延时量

会导致频谱梳峰稠密, 可能会超出光谱仪的分辨能力. 所以在 SPIDER 方法中, 延时时间、频谱剪切量和色散器件的展宽系数三者之间具有比较苛刻的依赖关系<sup>[12]</sup>. 对某些位相变化复杂陡峭的脉冲, 其位相差中的高频信息会在滤波的过程中被滤掉, 而无法重构此类脉冲的位相信息. 这些因素都决定了传统的 SPIDER 方法只适用于具有简单位相结构的脉冲测量<sup>[13]</sup>.

本文阐述了一种超快光脉冲测量的新方法, 我们称之为延时量可调的无干涉条纹 SPIDER 方法(delay control fringe free-SPIDER, DCFF-SPIDER). 在新方法中, 将单一的待测脉冲分别与展宽脉冲中的两个不同频率的单色光和频, 以产生一个仅有频谱剪切量而相对延时接近于零的脉冲对, 形成无干涉条纹的剪切干涉图. 新方法由于不需要傅里叶变换滤波, 只要简单的数学运算即可提取出脉冲的振幅与位相信息. 频谱剪切量的选取独立于延时量和色散展宽系数, 而且待测脉冲在进入和频晶体前没有经过任何光学元件, 保证了待测脉冲的位相原型, 所以 DCFF-SPIDER 方法可以克服如前面讨论的传统 SPIDER 方法的缺点. 最后提出无干涉条纹的剪切干涉图所存在的歧义性问题, 可以通过小延时量的调节消除. 同时给出了一系列可说明问题的数值模拟图.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60178020, 69888005, 10274107)及广东省自然科学基金(批准号: 011204)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: stslwz@zsu.edu.cn

## 2. DCFF-SPIDER 原理

传统的 SPIDER 方法所构造的有频谱剪切量的脉冲对具有相对延时量  $\tau$  (如图 1(a)), 目的是为了使得待测脉冲分别与啁啾展宽脉冲的高频和低频成分同步. 因为经过色散器件展宽后的啁啾脉冲的高低频成分是有相对延时量的, 设啁啾脉冲的高低频成分光频率差为  $\Omega$ , 时间差为  $\tau$ , 所以待测脉冲对的延时量也要调节为  $\tau$  方能跟它们同步. 实现该方法首先用分光镜和延迟线把待测脉冲复制成时间轴上一前一后的两个脉冲, 于是它们与展宽脉冲和频后的脉冲对的时域电场  $E_1(t), E_2(t)$  有相对延时  $\tau$ , 对应的傅里叶变换频域电场  $E_1(\omega), E_2(\omega)$  有频谱剪切量  $\Omega$ , 即

$$\begin{aligned} E_2(t) &= E_1(t + \tau), \\ E_2(\omega) &= E_1(\omega + \Omega). \end{aligned} \quad (1)$$

因此该脉冲对被光谱仪测量到的相干频谱图描述如下式<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} D(\omega) &= D_1(\omega) + D_2(\omega) + 2\sqrt{D_1(\omega)D_2(\omega)} \\ &\quad \times \cos[\Delta\phi(\omega) + \omega\tau], \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $D_1(\omega), D_2(\omega)$  分别是  $E_1(\omega), E_2(\omega)$  的模方, 即和频后的脉冲对中单个独立脉冲的频谱,  $\Delta\phi(\omega) = \phi(\omega + \Omega) - \phi(\omega)$  是  $E_1(\omega)$  和  $E_2(\omega)$  的光谱位相差. 设待测脉冲由钛宝石飞秒激光器发出, 脉宽

100 fs, 光谱带宽  $\Delta\omega = 2\pi \times 7$  THz, 中心频率  $\omega_0 = 2\pi \times 374$  THz ( $\Delta\lambda \sim 15$  nm,  $\lambda_0 = 802$  nm), 展宽脉冲的两个高、低频近单色光频率为  $\omega_1 = 2\pi \times 374$  THz 和  $\omega_2 = 2\pi \times 372$  THz ( $\Omega = 2\pi \times 2$  THz), 相对延时为  $\tau = 500$  fs, 而且具有较为复杂的位相信息, 则和频后的脉冲对的相干频谱图  $D(\omega)$  (如图 1(b)) (内插图为待测模拟脉冲). 对  $D(\omega)$  进行反傅里叶变换滤波即可把(3)式中的  $\omega\tau$  去掉而仅剩  $\Delta\phi(\omega)$ . 最后通过位相连接, 重构出以光谱剪切量  $\Omega$  为间隔的光谱位相. 然而反傅里叶变换滤波过程的存在导致了传统 SPIDER 方法具有不能测量脉宽较大或位相信息复杂的脉冲的缺点.

如果能控制相对延时为零也可以产生具有剪切量的脉冲对, 使得  $\omega\tau = 0$ , 则(2)式中的  $\omega\tau$  的作用可忽略, 变成

$$\Delta\phi(\omega) = \cos^{-1}\left(\frac{D(\omega) - D_1(\omega) - D_2(\omega)}{2\sqrt{D_1(\omega)D_2(\omega)}}\right), \quad (3)$$

于是  $\Delta\phi(\omega)$  不用经过反傅里叶变换滤波即可直接求取, 实现一种光谱位相的高精度直接测量. 在 DCFF-SPIDER 方法中, 我们用如下的办法实现零延时量的频谱剪切脉冲对的产生. 如图 1(c), 用单一的待测脉冲取代原来的待测脉冲对, 相当于使得原来的脉冲对的相对延时量为零. 与这个单脉冲和频的是展宽脉冲的某两个近单色的高频和低频频率成分, 由于这两个近单色成分是在空间上分开的,

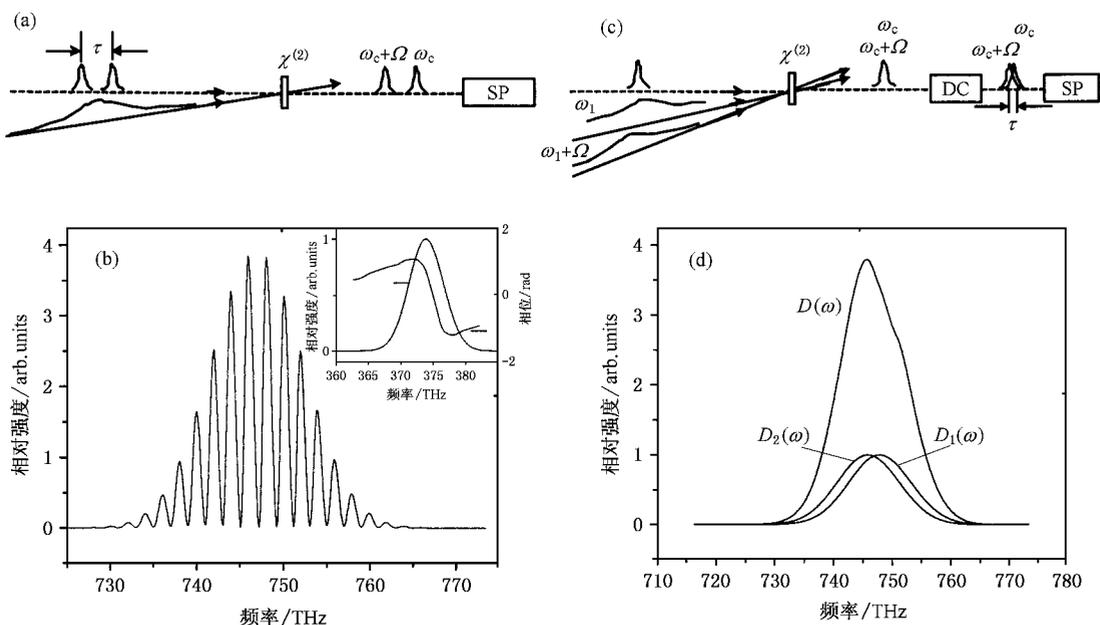


图1 传统 SPIDER 与 DCFF-SPIDER 的原理比较图

可以采用光栅对调节它们对待测脉冲的相对延时,使它们与待测脉冲同步,形成具有频谱剪切量的和频脉冲对.此脉冲对不同于传统的 SPIDER 方法所产生的和频脉冲对,它没有相对延时量.对同一个待测的模拟脉冲用这种方法数值模拟得到的光谱剪切干涉图  $D(\omega)$  如图 1(c) 所示.

同时我们注意到,如果要利用(3)式直接计算出频谱位相差,则  $\Delta\phi(\omega)$  必须满足条件

$$\Delta\phi(\omega) \in (0, \pi), \quad (4a)$$

然而当  $\Omega$  不是太大的时候,实际待测脉冲对的位相差  $\Delta\phi'(\omega)$  一般满足的条件是

$$\Delta\phi'(\omega) \in (-\pi/2, \pi/2). \quad (4b)$$

不能使用(3)式求取位相差.这是因为,由  $\cos$  函数的周期性和纵轴对称性决定,如果要想实现反  $\cos$  函数与自变量的唯一值关系,则自变量的变化范围必须落在  $\cos$  函数的同一个单调区间  $(0, \pi)$  中.而条件(4b)表明了对实验得到的某一个  $D(\omega_0)$ , 有  $\pm\phi(\omega_0)$  两个解,但只有其中的一个是待测脉冲的位相差,另一个是错误的计算结果.由此可见,在使用(3)式前必须先肯定形成  $D(\omega)$  的  $\Delta\phi(\omega)$  在单调区间范围,直接使用将产生谬误的待测脉冲位相修复结果.在数值模拟实验中,由图 1(c) 所修复出来

的位相曲线有如图 2 的四种可能,其中图 2(b) 才是待测脉冲的位相曲线,说明了 DCFF-SPIDER 方法的剪切干涉图具有位相修复的歧义性.

我们试图使用给和频脉冲对引进一个小量延时 (delay control, DC) 的办法以消除位相修复的歧义性.图 1(c) 中的 DC 器件使和频后的零延时量的脉冲对产生一个可精确控制的、大小为  $\tau' = \frac{\pi}{2\omega_a}$  的时间延时量,其中  $\omega_a$  为和频脉冲光谱带宽  $\Delta\omega$  范围内的任意圆频率,即  $\omega_c - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega_a < \omega_c + \frac{\Delta\omega}{2}$  ( $\omega_c$  为和频脉冲中心频率),所以  $\omega - \omega_a \ll \omega_a$ , 于是(3)式中的  $\Delta\phi(\omega)$  写成

$$\begin{aligned} \Delta\phi(\omega) &= \Delta\phi'(\omega) + \omega\tau' \\ &= \Delta\phi'(\omega) + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega - \omega_a}{\omega_a} \\ &\cong \Delta\phi'(\omega) + \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

由(4b)式可见经过引进小量延时后的剪切干涉图能保持原来的位相差表述形式,并可以满足(4a)式的直接求取位相差的运算条件,于是待测脉冲对的频谱位相差最终表述为

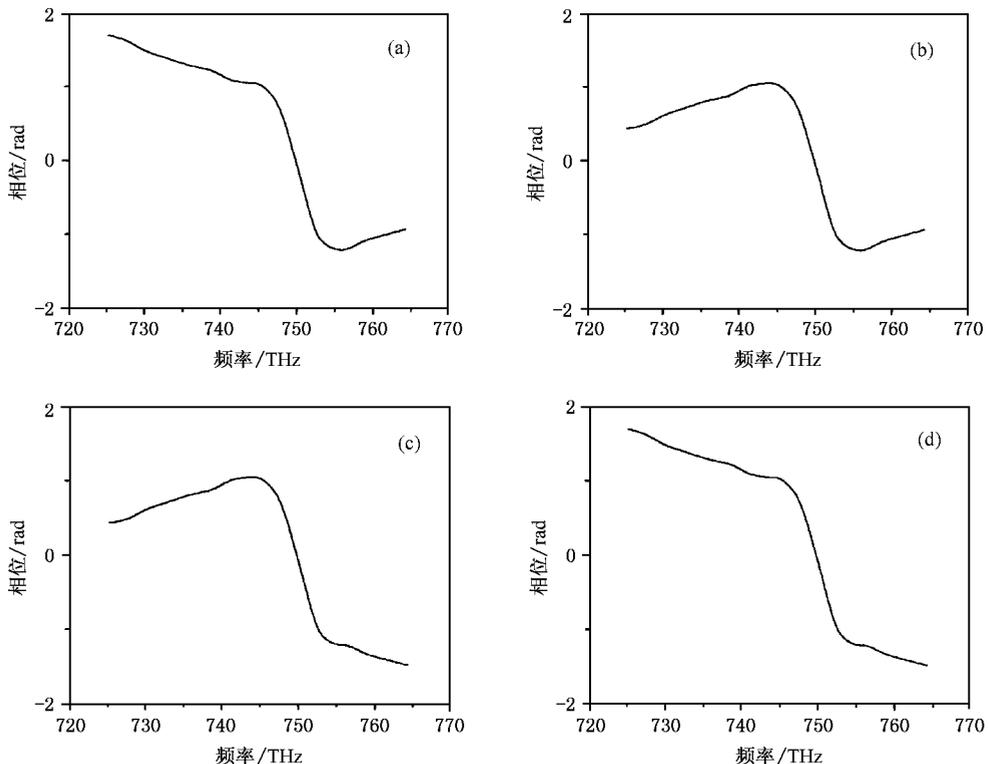


图 2 对同一个模拟的待测脉冲采用零延时量的 SPIDER 方法求取的频位相有四种可能的解

$$\Delta\phi'(\omega) = \cos^{-1}\left(\frac{D(\omega) - D_1(\omega) - D_2(\omega)}{2\sqrt{D_1(\omega)D_2(\omega)}}\right) - \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

所以只要测量出和频后经小量延时调节的脉冲对的独立频谱  $D_1(\omega)$ ,  $D_2(\omega)$  和剪切干涉图  $D(\omega)$ , 即可由(6)式直接计算出脉冲对的位相差。

### 3. 实验光路设计

DCFF-SPIDER 方法的实验光路设计如图 3. 待测脉冲需要由分光镜 BS 分出一部分同源激光以产生展宽脉冲对. 这部分激光被一个光栅对  $G_1, G_2$  在

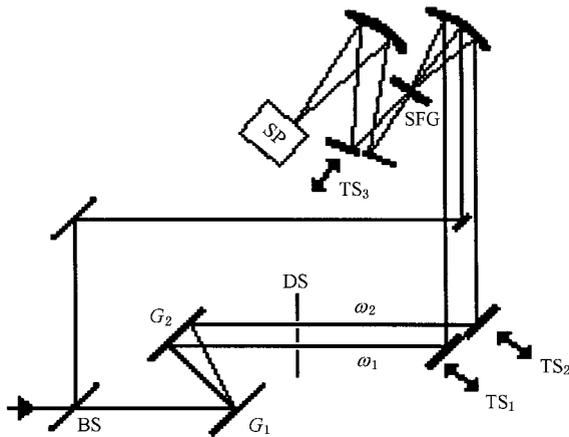


图 3 DCFF-SPIDER 实验光路设计图

空间上展开,并由一个双缝光阑 DS 任意挑选合适的准单色光,从而形成一个在空间上相互独立的低频  $\omega_1$  和 高频  $\omega_2 = \omega_1 + \Omega$  的长脉冲对,其中  $\Omega$  即为频谱剪切量.用这种方法产生的频谱剪切量,可以通过调节双缝光阑的缝间距并由光谱仪的直接检测而实现精确选取.得到的展宽脉冲对各自被两面装在延时器上的反射镜  $TS_1, TS_2$  反射,通过对延时器伸缩量的调节,使得展宽脉冲对中的两个长脉冲皆与待测脉冲同步.待测脉冲与展宽脉冲对聚焦于和频晶体 SFG 产生和频脉冲对,这里使用的是 II 类非线性晶体,以避免两个展宽脉冲对之间的混频现象出现.最后给其中的一个和频脉冲添加可调的小延时量  $TS_3$ (高精度压电陶瓷),以消除由光谱仪 SP 检测到的频谱干涉图的歧义性.

### 4. 结 论

我们对现今国际上主流的飞秒脉冲测量技术 SPIDER 方法进行了深入的理论研究,提出了一种能克服其固有缺点的新的测量改进方案.此方案主要是对具有频谱剪切量的脉冲对的频域位相差的测取作出了修改,也就是使用测量零延时量的无干涉条纹剪切干涉图直接反推出  $\Delta\phi(\omega)$  的方法,以取代传统 SPIDER 方法采用反傅里叶变换滤波求取  $\Delta\phi(\omega)$  的方法.同时讨论了新方法所存在的异值性问题,并给出一个控制小量延时的解决方案.根据理论研究结果,我们设计了一个可行的实验光路.相关的实验工作正在开展中.

[ 1 ] Morgner U, Kärtner F X, Cho S H et al 1999 *Opt. Lett.* **24** 411  
 [ 2 ] Sutter D H, Steinmeyer G, Gallmann L, Matuschek N et al 1999 *Opt. Lett.* **24** 631  
 [ 3 ] Baltuska A, Wei Z, Pshenichnikov M S, Wiersma D A, Szpöcs R 1997 *Appl. Phys. B* **65** 175  
 [ 4 ] Assion A, Maupert T, Bergt M, Brixner T, Kiefer B, Seyfried V, Strehle M, Gerber G 1998 *Science* **282** 919  
 [ 5 ] Sun T, Wong K S, Zhang W L et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2281 (in Chinese)[孙涛、黄锦圣、张伟力等 2002 物理学报 **51** 2281]  
 [ 6 ] Xia J F, Wei Z Y, Qiu Y et al 2001 *Chin. Phys.* **10** 946  
 [ 7 ] Kane D J and Trebino R 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-29** 571

[ 8 ] Deng L, Liao R, Liu Y X et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1938 (in Chinese)[邓莉、廖睿、刘叶新等 2003 物理学报 **52** 1938]  
 [ 9 ] Iaconis C, Walmsley I A 1999 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-35** 501  
 [ 10 ] Chai L, He T Y, Gao F, Wang Q Y et al 2004 *Chin. Phys.* **13** 1487  
 [ 11 ] Dorrer C, Beauvoir B, Blanc C, Ranc S et al 1999 *Opt. Lett.* **24** 1644  
 [ 12 ] Chai L, He T Y et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 114 (in Chinese)[柴路、何铁英等 2004 物理学报 **53** 114]  
 [ 13 ] Gallmann L, Sutter D H, Matuschek N et al 2000 *Appl. Phys. B* **70** S67

# Fringe-free spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction<sup>\*</sup>

Lei Liang Wen Jin-Hui Jiao Zhong-Xing Shou Qian Wu Yu Liu Lu-Ning

Lai Tian-Shu Lin Wei-Zhu

(*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Department of Physics, Zhongshan (Sun Yet-Sen) University, Guangzhou 510275, China*)

(Received 23 February 2005; revised manuscript received 8 June 2005)

## Abstract

A novel spectral phase interferometry reconstruction for ultrashort optical pulse measurement with high accuracy is presented to overcome the shortcomings of conventional SPIDER. The measured pulse and its two chirped and delayed replicas are mixed synchronously to generate a fringe-free interference pattern. By introducing a suitable small delay into the interference pattern the spectral phase of the measured pulse is retrieved directly and uniquely without using Fourier transformation. This technique is capable of characterizing pulses with long duration or/and complex phase structure.

**Keywords** : SPIDER, characterization of femtosecond pulses, ultrafast optics

**PACC** : 4280W, 4260F, 4265K

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60178020, 69888005 and 10274107), and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 011204).