

飞秒脉冲振幅和相位的无干涉条纹重构法测量^{*}

雷 亮 文锦辉 焦中兴 赖天树 林位株[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2007 年 3 月 21 日收到, 2007 年 5 月 14 日收到修改稿)

对作者所提出的无干涉条纹直接电场重构测量飞秒脉冲的振幅和相位的新方法作出进一步理论分析, 并通过实验测量说明该方法的优越性. 该方法克服了传统的 SPIDER 方法的弊病, 能得到一组无干涉条纹的图像, 排除传统方法必须使用傅里叶变换滤波消除干涉条纹而引入的系统误差, 使得该方法能够采用较简便设备且能较准确测量飞秒脉冲强度轮廓和相位. 最后给出同一条件下新方法和传统 SPIDER 方法分别重构的脉冲强度自相关曲线与实验测量结果的比较, 以说明新方法的有效性和优越性.

关键词: 光谱相位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

近年来, 亚十飞秒脉冲和阿秒脉冲以及超高速光信息技术的发展, 使得发展快速的飞秒脉冲信息诊断方法成为当前超快激光领域的重要课题^[1-4]. 现今国际上能实现光脉冲强度和相位测量的主流方法是 FROG^[5]和 SPIDER^[6,7]方法, 这两种方法各有其优缺点. 由于 FROG 方法在复杂的重构算法中需耗大量的迭代时间, 无法实现飞秒脉冲的实时测量. 而 SPIDER 方法则是一种快速测量方法, 但由于直接测量对象是和频脉冲对的干涉频谱图, 此频谱图由于延时差的存在呈梳状结构, 即具有密集的干涉条纹, 对光谱仪的分辨率要求极高; 并且微弱的噪声即能改变梳峰结构, 导致重构出来的相位结果有较大的畸变; 同时需要对实验结果进行傅里叶变换滤波处理以去除干涉条纹, 这个过程也会引入系统误差. 为了解决传统 SPIDER 方法所固有的问题, 国际上已有相关的文献报道^[8-12], 但这些改进都没有讨论到干涉条纹分辨率对测量结果的影响问题, 更没有提出这方面的改进方法. 因此, 在传统 SPIDER 原理基础上发展一种能克服以上缺点、继承优点的新方法就很有必要.

为此, 我们提出了无干涉条纹的光谱相位相干

直接电场重构法 (Fringe Free-SPIDER, 即 FF-SPIDER), 此法的理论研究已在前期工作中报道过^[13,14]. 本文在前期理论工作的基础上作进一步分析并给出实验论证的结果. 文中首先给出同一个特定脉冲在系统误差存在和光谱仪分辨率不足的情况下 FF-SPIDER 和传统 SPIDER 方法的相位修复结果, 以说明它们不同的测量准确度. 本文实验部分给出了在相同条件下分别用 FF-SPIDER 方法和传统 SPIDER 方法重构的待测飞秒脉冲的强度轮廓线、时域和频域的相位曲线, 以及由此所得的脉冲强度自相关曲线并与实验测量得到的自相关曲线进行了对比分析, 说明了 FF-SPIDER 方法的优点.

2. FF-SPIDER 理论

飞秒脉冲光波场振幅在时域可表述成 $\tilde{E}(t)$, $|\tilde{E}(t)|^2$ 为光脉冲强度, 它的频域的振幅形式为

$$\tilde{E}(\omega) = |\tilde{E}(\omega)| \exp[i\varphi(\omega)], \quad (1)$$

其中 $|\tilde{E}(\omega)|^2$ 就是待测飞秒脉冲的功率频谱, 是一个可直接测量的量. 换言之, 只要能测量出光脉冲的功率频谱和 (1) 式中的 $\varphi(\omega)$ 则 $\tilde{E}(\omega)$ 可以确定, 而且时域的全部信息 $\tilde{E}(t)$ 也可以通过以下的傅里叶

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10274107, 69888005, 10674184) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: stslwz@mail.sysu.edu.cn

变换关系得以完整测量：

$$\tilde{E}(t) = \int \tilde{E}(\omega) d\omega. \quad (2)$$

FF-SPIDER 方法的基本原理与传统的 SPIDER 一样,都是以测取 $\varphi(\omega)$ 为最终实验目的,而 $\varphi(\omega)$ 是通过调制和频谱相干叠加方法求得.其具体步骤是先获得待测脉冲 $\tilde{E}(\omega)$ 分别与中心频率为 ω_0 和 $\omega_0 + \Omega$ 的准单色光(这种准单色光实际上是将待测脉冲啁啾展宽,取其高频和低频中的准单色成分而成, Ω 称频谱剪切量)和频产生脉冲对 $\tilde{E}_1(\omega)$ 和 $\tilde{E}_2(\omega)$,如图 1(a)所示,数学表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1(\omega) &= |\tilde{E}(\omega + \omega_0)| \exp[i\varphi(\omega + \omega_0)], \\ \tilde{E}_2(\omega) &= |\tilde{E}(\omega + \omega_0 - \Omega)| \\ &\quad \times \exp[i\varphi(\omega + \omega_0 - \Omega)]. \end{aligned} \quad (3)$$

令 $D_1(\omega) = |E_1(\omega)|^2$, $D_2(\omega) = |E_2(\omega)|^2$, 则上述和频脉冲对的相干叠加场频谱为

$$\begin{aligned} D(\omega) &= |\tilde{E}_1(\omega) + \tilde{E}_2(\omega)|^2 \\ &= D_1(\omega) + D_2(\omega) + 2\sqrt{D_1(\omega)D_2(\omega)} \\ &\quad \times \cos[\Delta\varphi(\omega)], \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega). \quad (5)$$

只要求得相位差曲线 $\Delta\varphi(\omega)$, $\varphi(\omega)$ 即可用相位级联方法^[6]确定

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\Omega} \int [\varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)] d\omega. \quad (6)$$

这种方法的依据是待测脉冲与单色光的和频相当于其频谱平移,并不改变其相位特性,而频率差为 Ω 的相邻两个和频光的相干频谱则与其相位差

有关.当然,单色光的单色性对和频前后的相位一致性有重要影响,所以单色光必须合理选择^[15].

传统的 SPIDER 与 FF-SPIDER 的差别就在于由和频脉冲对求取相位差曲线 $\Delta\varphi(\omega)$ 的问题上.用传统的 SPIDER 方法所得的 $\tilde{E}_1(\omega)$, $\tilde{E}_2(\omega)$ 在包含频谱剪切量差的同时还包含了一个时间延时因子 $\exp(i\tau\omega)$, τ 的引入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光同步,是此方法本身所固有的特点,它导致所得到的实验结果是一个具有稠密梳状结构的干涉频谱图,如图 1(b).于是在传统的 SPIDER 方法中必须附带一个傅里叶变换滤波过程以消除延时因子,同时在这个过程中的系统误差的引入也是不可避免的(其影响在下一节中讨论).而 FF-SPIDER 方法的特点就在于改进实验原理,不是把被测脉冲分裂成两个有相对时间延迟的脉冲,而是对啁啾展宽脉冲的高频和低频成分在时轴上的相对延迟进行补偿,使其各自与被测脉冲光同步.这样,从一开始就构造出一个没有时间延时因子存在的和频脉冲对,所拍摄得到的干涉频谱图便没有干涉条纹,如图 1(a)所示.所以此法称为无干涉条纹的光谱相位相干直接电场重构法.

FF-SPIDER 通过一组频谱图求取 $\Delta\varphi(\omega)$ 的计算方法非常直观、简便.拍摄和频脉冲对的干涉频谱图 $D(\omega)$ 的同时,也分别拍摄两个和频脉冲的功率频谱 $D_1(\omega)$ 和 $D_2(\omega)$,于是 $\Delta\varphi(\omega)$ 可根据(5)式和实验结果由下式求得^[13]:

$$\Delta\varphi(\omega) = \cos^{-1} \left(\frac{D(\omega) - D_1(\omega) - D_2(\omega)}{2\sqrt{D_1(\omega)D_2(\omega)}} \right). \quad (7)$$

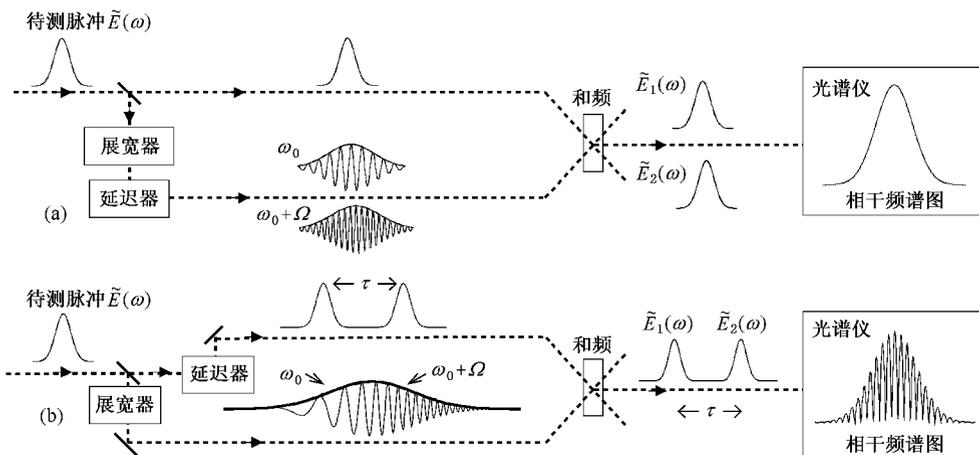


图 1 FF-SPIDER (a) 与传统 SPIDER (b) 原理图

这个过程不需要傅里叶变换,几乎不用耗费计算时间就能高效、直观、简捷地求出和频脉冲对的频域相位差,非常适合自动化系统对待测脉冲进行实时监控,也是该方法能实现对复杂相位脉冲准确测量的原因。

3. 传统 SPIDER 与 FF-SPIDER 的相位修复结果比较

传统 SPIDER 实验的成功与否依赖于延时时间、频谱剪切量和色散器件的展宽系数三者之间严格的配对关系^[16]。事实上,我们在实验过程中发现,即使找到了最好的配对点,相位修复的结果由于光谱仪分辨率不足和傅里叶变换滤波会放大噪声等原因,造成信噪比小,误差较大。

我们以如下的数值模拟作说明。假设待测脉冲有如图 2(a)所示的功率频谱强度和相位(粗实线),频谱范围约从 680—800nm。在传统 SPIDER 方法中脉冲延时时间假设为 $\tau = 500$ fs (远大于待测脉冲宽度),频谱剪切量 $\Omega = 1.36$ nm (远小于频谱宽度),其相干频谱理论曲线如图 2(b)所示。由此曲线可计算出功率频谱的相位曲线如图 2(a)所示的正方形数据点连线。此曲线与设定的相位曲线在低频部分大致符合,而在频谱较复杂的高频部分两者却有明显的差别,这是因传统 SPIDER 方法的上述局限性所造成的。而且,在实验上要获得如图 2(b)所示的干涉功率频谱,则光谱仪的分辨率要优于 0.05 nm,其他实验条件也要求很稳定,这在一般条件下是不容易实现的。如果使用分辨率为 0.2 nm 的普通精度光谱仪,则只能拍摄到如图 2(c)所示的相干频谱图。根据此图得到的频谱相位曲线如图 2(a)中圆圈数据点连线所示,它在所示的光谱范围内都明显地偏离了待测相位。然而在同等光谱仪分辨率情况下,FF-SPIDER 方法得到如图 2(d)的数值模拟结果,此结果经运算却依然能修复得与待测相位近似一致的曲线(如图 2(a)三角数据点连线所示)。显然,在一般高精度光谱分辨率情况下,传统 SPIDER 所修复频谱相位的结果存在严重的谬误,而使用改进型的 FF-SPIDER 方法却能得到较准确的频域相位。

4. 实 验

FF-SPIDER 方法的实验测量光路示于图 3。它与

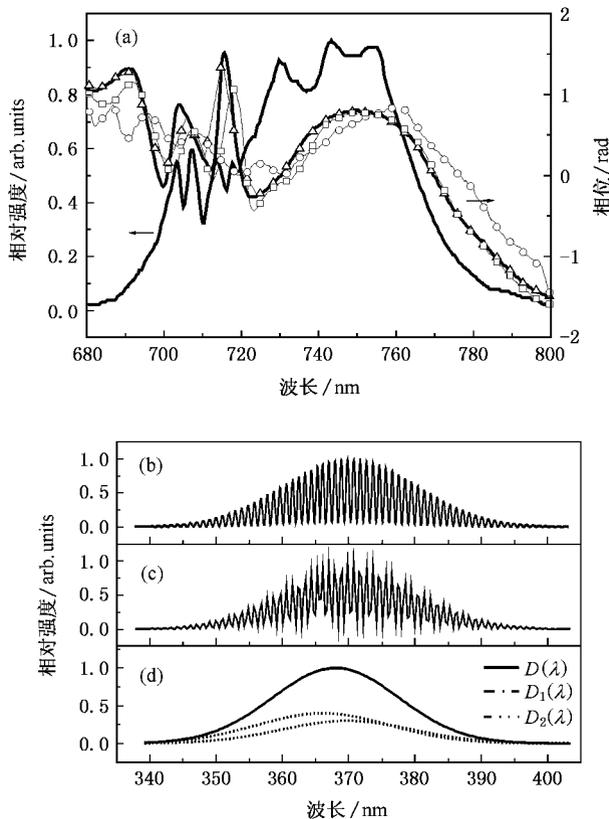


图 2 (a)数值模拟假设的待测脉冲频谱(细实线)和频域相位(粗实线)以及对应(b)(c)(d)方案分别修复得的相位(b)传统 SPIDER 的模拟实验曲线(光谱仪分辨率优于 0.05 nm)(c)传统 SPIDER 的模拟实验曲线(光谱仪分辨率为 0.2 nm)(d) FF-SPIDER 的模拟实验曲线(光谱仪分辨率同(c))

典型的飞秒脉冲自相关仪相类似,只在其中的一臂插入一反射光栅(1200/mm)和一对带有小延时的反射镜,它能使上述啁啾展宽脉冲的中心频率分别为 ω_0 和 $\omega_0 + \Omega$ 、相对时延约 500 fs 的两个近单色光获得恰当的补偿而待测脉冲同步。这是它和传统 SPIDER 方法的不同之处,后者是把待测脉冲分裂为具有上述延时量的脉冲对。实验中以本实验室所建立的 KLM 钛宝石飞秒激光器所输出的带宽为 30 nm、脉宽为 20 fs (FWHM)的脉冲为待测脉冲,光谱记录仪器使用北京光学仪器厂出品的 VII 型自动记录单色仪,分辨率为 0.2 nm。

图 4(a)中两虚线分别为 FF-SPIDER 测量中两和频脉冲对的功率频谱图 $D_1(\lambda)$, $D_2(\lambda)$;实线则为它们的干涉频谱图 $D(\lambda)$ 。将波长 λ 与圆频率 ω 作简易的对应运算,再应用(7)式和相位级联方法计算得待测脉冲功率频谱的相位曲线标示于图 4(c)中的三角型数据点连线。图 4(c)中实线为实验测得的

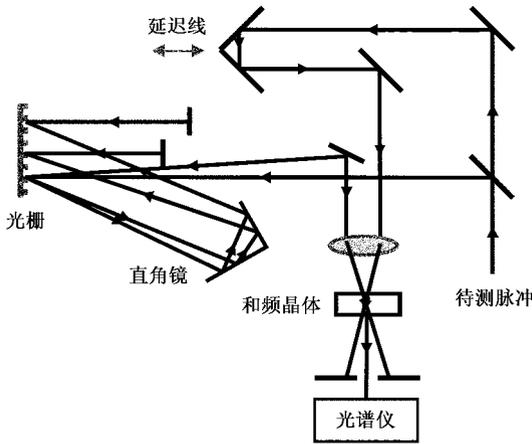


图 3 FF-SPIDER 实验光路示意图

待测脉冲功率频谱. 作为比较, 图 4(b) 示出在同等实验条件下使用传统 SPIDER 方法测得的带梳状条纹的干涉频谱, 由其计得的待测脉冲功率频谱的相位曲线则示于图 4(c) 中的圆圈数据点连线. 实验时控制频谱剪切量都为 $\Omega = 1.52 \text{ THz}$ ($\sim 3.45 \text{ nm}$), 使得两种方法所求得的相位差曲线具有可比性.

从图 4(c) 可以看出, FF-SPIDER 重构出一条较为光滑的待测脉冲功率频谱相位曲线. 分析此曲线, 可见在中心波长 740 nm 附近以及高频区的频谱相位与一条抛物线相符合, 说明待测脉冲功率频谱的主要部分呈线性啁啾结构, 其相位特性是以二阶色散为主, 色散系数为 119 fs^2 ; 在低频的 $670\text{--}720 \text{ nm}$ 频谱区域有比较复杂的相位结构, 但由于此处的频谱强度较弱, 对待测脉冲的分析和压缩影响较少. 然而由传统 SPIDER 方法重构的待测脉冲功率频谱相位曲线在中心频率附近明显偏离抛物线型; 在频谱的两翼起伏亦较大, 由此相位曲线难于对待测脉冲

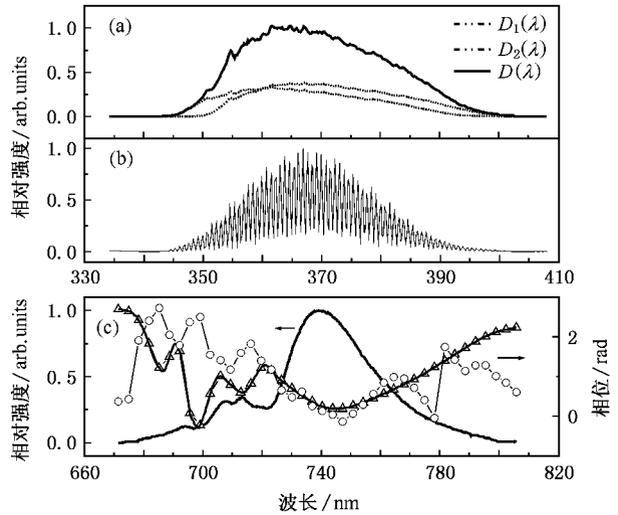


图 4 (a) FF-SPIDER 实验曲线; (b) 同等实验条件下的传统 SPIDER 实验曲线 (c) 待测光频谱及两种方法所修复得的频域相位曲线比较

啁啾情况作恰当的分析. 这一情况与上述计算模拟中显示的在同等条件下传统 SPIDER 方法获得的结果偏离待测相位较大的情况一致.

为了进一步说明 FF-SPIDER 方法的特色, 我们由上述两种方法中获得的频谱相位曲线重构待测飞秒脉冲的振幅和相位, 并比照实验测量结果. 图 5(a) 中的实曲线和虚曲线分别是用图 4(c) 中的待测飞秒脉冲的功率频谱曲线与由 FF-SPIDER 方法得到的相位曲线和由传统 SPIDER 方法得到的相位曲线经傅里叶变换式 (2) 重构得到的待测飞秒脉冲的强度振幅和相位曲线, 两者存在明显的差异. 前者基本上是带有正啁啾的双曲正割曲线; 后者的振幅和相位则呈现较大的畸变. 由上述重构的两种脉冲振幅

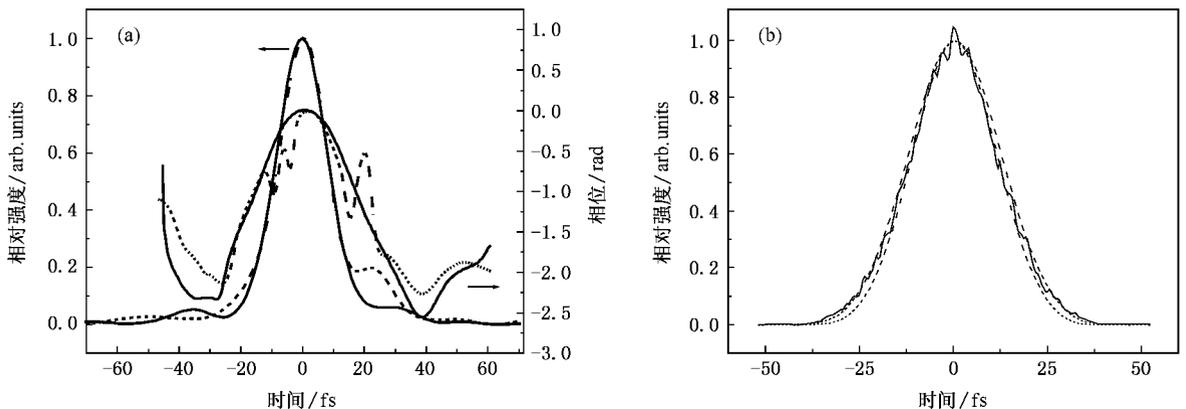


图 5 (a) FF-SPIDER 求得的脉冲时域振幅与相位(实线)传统 SPIDER 求得的脉冲时域振幅与相位(虚线) (b) 实验测得的自相关曲线(实线), FF-SPIDER 实验结果计算得到的自相关曲线(虚线), 传统 SPIDER 实验结果计算得到的自相关曲线(点划线)

曲线分别计算得到的时域强度自相关曲线和实验上测得的待测脉冲的强度自相关曲线一同示于图 5 (b)作比较.由图可见,FF-SPIDER 修复得到的脉冲对应的强度自相关曲线(虚线),比起传统 SPIDER 方法对应的强度自相关曲线(点划线),更接近实验测量得到的强度自相关曲线(实线).这从实验的角度证明了两组曲线中新方法修复出来的结果更代表待测脉冲的实际信息.

5. 结 论

本文从理论模拟和实验测量上说明了无干涉条纹的相位相干直接电场重构法(FF-SPIDER)的有效

性和优越性. FF-SPIDER 方法不是把待测脉冲分裂成两个有相对时间延迟的脉冲,而是对啁啾展宽脉冲中具有频率剪切差而且在时间上有相对延迟的两个准单色成分作时间补偿,使其与待测脉冲同步而获得和频信号和无干涉条纹的相干频谱.这就克服了传统 SPIDER 方法中有干涉条纹相干频谱所带来的理论分析计算上和实验测量上的弊病,简化了计算量,减少了噪声的影响,降低了对实验设备条件的要求,提高了测量效率和准确度.说明这种无干涉条纹的直接电场重构法是一种可以应用于皮秒和飞秒脉冲振幅和相位信息测量的较简便和准确的新型测量技术.

-
- [1] Baltuska A , Wei Z , Pshenichnikov M S , Wiersma D A , Szpöcs R 1997 *Appl. Phys.* B **65** 175
- [2] Assion A , Maupert T , Bergt M , Brixner T , Kiefer B , Seyfried V , Strehle M , Gerber G 1998 *Science* **282** 919
- [3] Kienberger R , Krausz F 2004 *Physica Scripta T* **110** 32
- [4] Zhao W , Liu H J , Wang Y S , Wang H Y , Cheng Z , Chen G F 2005 *Chinese Physics* **14** 359
- [5] Kane D J , Trebino R 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-29** 571
- [6] Iaconis C , Walmsley I A 1999 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-35** 501
- [7] Iaconis C , Walmsley I A 1998 *Opt. Lett.* **23** 792
- [8] Dorrer C , Walmsley I A 2002 *J. Opt. Soc. Am.* B **19** 1019
- [9] Baum P , Lochbrunner S , Riedle E 2003 *Opt. Lett.* **29** 210
- [10] Wang P , Wang Z H , Wei Z Y , Zheng J A , Sun J H , Zhang J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3004 (in Chinese) [王 鹏、王兆华、魏志义、郑加安、孙敬华、张 杰 2004 物理学报 **53** 3004]
- [11] Chai L , He T Y , Gao F , Wang Q Y , Xing Q R , Zhang Z G 2004 *Chinese Physics* **13** 1487
- [12] Kosik E M , Radunsky A S , Walmsley I A , Dorrer C 2006 *Opt. Lett.* **30** 210
- [13] Lei L , Wen J H , Jiao Z X , Shou Q , Wu Y , Liu L N , Lai T S , Lin W Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 244 (in Chinese) [雷 亮、文锦辉、焦中兴、寿 倩、吴 羽、刘鲁宁、赖天树、林位株 2006 物理学报 **55** 244]
- [14] Wen J H , Lei L , Jiao Z X , Lai T S , Lin W Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1883 (in Chinese) [文锦辉、雷 亮、焦中兴、赖天树、林位株 2006 物理学报 **55** 1883]
- [15] Foing J P , Likforman J P , Joffre M , Migus A 1992 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-28** 2285
- [16] Chai L , He T Y , Yang S J , Wang Y Q , Zhang Z G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 114 (in Chinese) [柴 路、何铁英、杨胜杰、王清月、张志刚 2004 物理学报 **53** 114]

The amplitude and phase measurements of femtosecond pulses using fringe-free SPIDER^{*}

Lei Liang Wen Jin-Hui Jiao Zhong-Xing 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 21 March 2007; revised manuscript received 14 May 2007)

Abstract

A developed method of fringe free spectral phase interferometry reconstruction (FF-SPIDER) for femtosecond pulse measurement is demonstrated with theoretical simulation and experimental measurements. FF-SPIDER overcomes the disadvantages of the traditional SPIDER in which the time delay measured pulse replica results in fringes in the interference spectrum and complicates the spectral phase reconstruction. The measurement results show that FF-SPIDER reconstructs the amplitude and phase of the measured pulses with higher efficiency, higher accurate and lower requirements on measurement apparatus.

Keywords: spectral phase interferometry for direct electrical-field reconstruction, characterization of femtosecond pulses, ultrafast optics

PACC: 4280W, 4260F, 4265K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10274107, 69888005 and 10674184).

[†] E-mail: stslwz@mail.sysu.edu.cn