

文章编号: 0258-7025(2002)08-0739-04

飞秒激光光谱位相干涉仪的数值模拟与分析

柴路¹, 高峰², 王清月¹, 邢岐荣¹, 张志刚¹

(天津大学¹精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电子信息技术科学教育部重点实验室²理学院, 天津 300072)

提要 对用光谱位相相干直接电场重建法(SPIDER)测量飞秒光脉冲啾啾特性的光谱位相干涉仪进行了数值模拟; 对假设具有不同类型啾啾的飞秒脉冲进行光谱位相重构, 还原出时域脉冲强度包络和位相, 并与实验结果进行了比较。

关键词 位相测量, 光谱剪裁, 光谱位相相干直接电场重建法

中图分类号 TN 744.3 ; O 242.1 **文献标识码** A

Numerical Experiment and Analysis for Characterizing Femtosecond Pulses with SPIDER

CHAI Lu¹, GAO Feng², WANG Qing-yue¹, XING Qi-rong¹, ZHANG Zhi-gang¹

(¹Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, ²School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The numerical analyses have been conducted for characterizing femtosecond laser pulses with the spectral phase interferometry for direct electrical field reconstruction(SPIDER). The spectral phases and amplitudes of the typical femtosecond pulses were reconstructed, as well as the temporal intensity profiles and temporal phases of these pulses were retrieved. The numerical results are in accord with experimental observations.

Key words phase measurement, spectral shear, SPIDER, femtosecond laser pulses

1 引 言

近十年来,飞秒脉冲技术取得了令人瞩目的进展,飞秒脉冲的产生、传输、放大、整形和频率变换技术日趋成熟。特别是最近几年,国际上采用各种技术已经获得了脉宽在 5 fs 左右的光脉冲^[1~3]。当脉冲宽度短至 10 fs 以下时,其光谱特性一般为调制谱,这说明脉冲形状已经明显偏离双曲正割函数或高斯函数,因此从以假设脉冲形状为前提的传统自相关测量脉宽的方法中已经不能得到脉冲宽度的真实信息。此外,在许多应用研究中还需要精确了解脉冲的位相(啾啾)等特征,因此研究新的飞秒脉冲

测量技术是非常必要的。

目前,国际上认可的新型飞秒脉冲测量方法有两种,它们可以直接从测量得到的数据中重构出脉冲的振幅和相位,而不需要任何限制性的假设。一种是频率分辨光学开关法(FROG),另一种是光谱位相相干直接电场重建法(SPIDER),这两种方法已经被应用于 10 fs 以下脉冲的测量中^[4]。二者相比,SPIDER 对脉冲能量要求不高,可以直接测量从激光振荡级输出的脉冲,而且它重构脉冲位相的算法简单快捷,可以作为实时测量的工具^[5]。

本文阐述了基于光谱位相相干的直接电场重建

收稿日期 2001-11-15;收到修改稿日期 2002-04-01

基金项目 国家自然科学基金(No. 60178007),天津市自然科学基金(No. 0201-413188),国家重点基础研究项目特别基金(No. G1999075201-2)资助课题。

作者简介 柴路(1956—),男,天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授,博士,主要从事飞秒激光与超快现象的研究。

E-mail: lull@tju.edu.cn

法测量飞秒脉冲位相的基本原理,对几种情况的飞秒脉冲进行了计算机模拟,并与实验结果进行了比较。

2 SPIDER 的基本理论

图1是SPIDER装置示意图。当待测的脉冲进入装置后,首先被分束器分为两束,其中一束进入展宽器中展宽为啁啾脉冲,另一束经迈克尔逊干涉仪装置分为两个具有时间延迟 τ 的脉冲对。这两个脉冲除了具有时间延迟 τ 以外没有任何差别,它们与另外一束的啁啾脉冲共线合成,以I类相位匹配方式在BBO晶体中进行频率上转换。由于两脉冲在时间上的走离,在和频之后它们的中心频率就出现了微小的差别,这个频率差称为光谱剪裁或频率剪裁(Spectral shear)^[6]。和频后的脉冲对经过光谱仪记录下光谱相干的干涉条纹,将干涉条纹输入到计算机中并用SPIDER的反演算法处理就可以得到入射脉冲的位相。

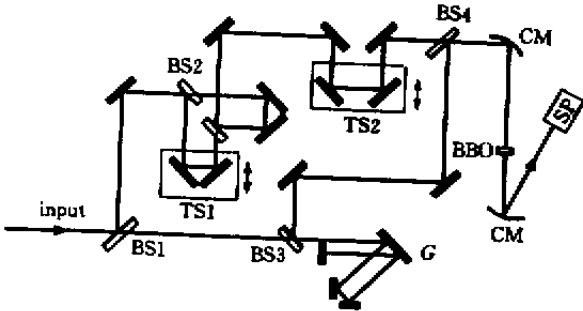


图1 基于直接电场重建法的光谱位相干涉仪装置图

Fig.1 Schematic of the SPIDER

SPIDER的原始数据是光谱仪记录的干涉条纹,设经光谱剪裁后两脉冲的中心频率分别为 ω_c 和 $\omega_c - \Omega$,则干涉条纹可以用下面的公式表示^[7]

$$D(\omega, \tau) = |E(\omega_c - \Omega)|^2 + |E(\omega_c)|^2 + 2|E(\omega_c - \Omega)||E(\omega_c)| \times \cos[\theta(\omega_c) - \omega\tau] \quad (1)$$

$$\theta(\omega_c) = \varphi_\omega(\omega_c - \Omega) - \varphi_\omega(\omega_c) \quad (2)$$

$$\Omega = -\tau/\varphi'' \quad (3)$$

$D(\omega, \tau)$ 是一个标准的光谱剪裁干涉图的表达式,其中 Ω 为光谱剪裁量, φ'' 为展宽器的二阶色散, $E(\omega_c - \Omega)$ 和 $E(\omega_c)$ 为输入脉冲对的光谱表示。式(1)中的前两项是时域 $t = 0$ 分量的傅里叶变换,为干涉图的直流分量,最后一项是在时域 $t = \pm \tau$ 分

量的傅里叶变换,为交流分量。干涉图的条纹间隔为 $2\pi/\tau$ (1)式中 $\omega\tau$ 是干涉条纹的快变部分,为线性项, $\theta(\omega)$ 是慢变或者微扰部分,其中就包含了脉冲的位相成分。光谱位相相干直接电场重建法就是要从(1)式中提取出位相差 $\theta(\omega)$,进而重建出光谱位相 $\varphi(\omega)$, $\omega = \omega_0 \pm n\Omega$,这是一系列以 Ω 为间隔的频率所对应的位相。

3 飞秒脉冲光谱位相重构的数值模拟

3.1 SPIDER 反演算法的基本原理

根据以上光谱位相干涉仪的基本原理,数值模拟实验的流程图见图2。由图可见,重构脉冲位相需要三个步骤。第一步,用傅里叶变换和滤波技术把式(1)中的一个交流分量分离出来。第二步,从滤波后得到的位相项中减去线性项 $\omega_c\tau$,就得到位相差 $\theta(\omega)$,这种由Takeda提出的方法称为光谱相干法^[8]。线性项 $\omega_c\tau$ 可通过实际测量获得,可靠的方法是挡掉啁啾脉冲,测量两个脉冲直接的干涉图,然后还原干涉图得到 $\omega_c\tau$ 。第三步,由位相差 $\varphi_\omega(\omega_c - \Omega) - \varphi_\omega(\omega_c)$,可以得到脉冲的位相 $\varphi_\omega(\omega_0 \pm n\Omega)$, n 为正整数。注意到位相差 $\theta(\omega_c) = \varphi_\omega(\omega_c - \Omega) - \varphi_\omega(\omega_c)$ 是已知量,简单地联接一系列位相差,就得到了重建的间隔为光谱剪裁 Ω 的脉冲光谱位相。

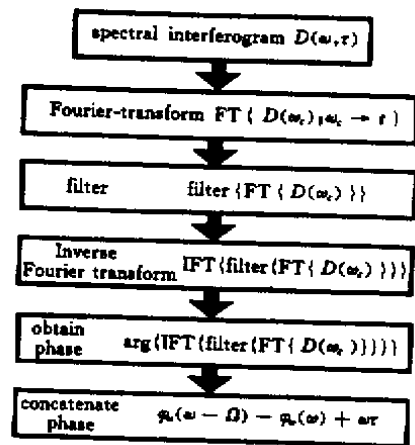


图2 SPIDER 算法流程图

Fig.2 Flow diagram illustrating the retrieval of the spectral phase used for SPIDER

3.2 数值模拟计算与分析

在模拟计算中,首先考虑入射脉冲宽度为 $t_{\text{pin}} = 50$ fs,中心波长800 nm的高斯型脉冲。经过迈克尔逊干涉仪后产生的两脉冲的延迟 $\tau = 2.1$ ps,展宽

器是由一块 1200 条/mm 的光栅和一个直角反射镜组成的。光栅与直角反射镜的距离为 5 cm,在这种放置方法中,光束被光栅反射了四次,相当于两次通过一平行光栅对,提供的色散量为 $\ddot{\varphi} = 3.46 \times 10^5 \text{ fs}^2$,展宽得到的啁啾脉冲的脉宽约为 20 ps,计算得到的频率剪裁量 $\Omega = 1.94\pi \text{ THz}$ 。为了讨论脉冲的啁啾情况,将脉冲电场表示为

$$E(t) = \exp(-at^2 + ibt^2 + ict^3 + \dots) \cdot \exp(-i\omega_c t) \quad (4)$$

其中, $a = 2\ln 2 \cdot t_{\text{pin}}^{-2}$, b, c 等为相位项的系数。

对于无啁啾(变换极限)脉冲,在(4)式中,令 $b = c = \dots = 0$,即为变换极限脉冲,由数值模拟得到的入射脉冲的光谱位相见图 3,由位相曲线可以看出,在脉冲频谱带宽的范围内的光谱位相曲线的斜率为零,即表明脉冲带有的啁啾量为零。对光谱位相和强度再做一次傅里叶变换就还原出入射脉冲在时域的振幅和位相(见图 3 中的插图)。

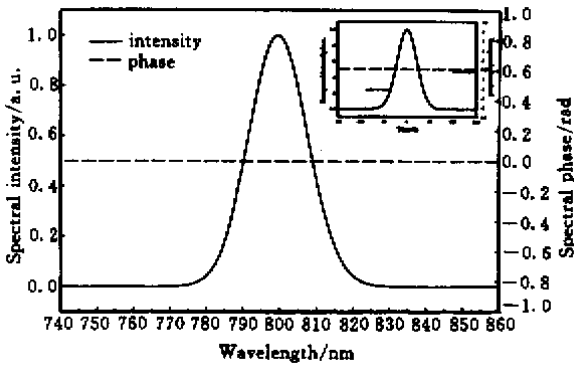


图3 重构的无啁啾脉冲的光谱位相及光谱
(插图为还原的时域脉冲强度包络及位相)

Fig.3 Spectral intensity and phase for the transform-limited pulse. Inset: reconstructed temporal intensity profile and corresponding temporal phase of the pulse

当 $b \neq 0$,而其余相位项系数为零时,入射脉冲为线性啁啾脉冲,取 $b = \sqrt{2}a$,重构得到的光谱位相如图 4,还原出的时域位相见图 4 中插图。从图中可见,光谱位相在脉冲频谱带宽范围内呈抛物线状,求导后为一条直线,即反映出啁啾是线性的。

若令 $c = 1.0/t_{\text{pin}}^3$,其余相位项系数为零时,则脉冲的位相为三阶位相,经模拟还原得到的光谱位相见图 5,相应的时域位相见图 5 中插图。时域图中的位相曲线呈 S 形状,谱域位相曲线在长波端出现调制,这是典型的脉冲含有三阶色散的位相曲线。根据此模型还可以还原出含有各种混合色散的飞秒

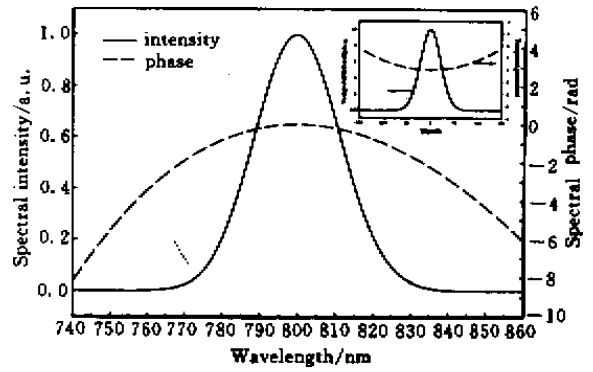


图4 重构的线性啁啾脉冲的光谱位相及光谱
(插图为还原的时域脉冲强度包络及位相)

Fig.4 Spectral intensity and phase for the linearly chirped pulse. Inset: reconstructed temporal intensity profile and corresponding temporal phase of the pulse

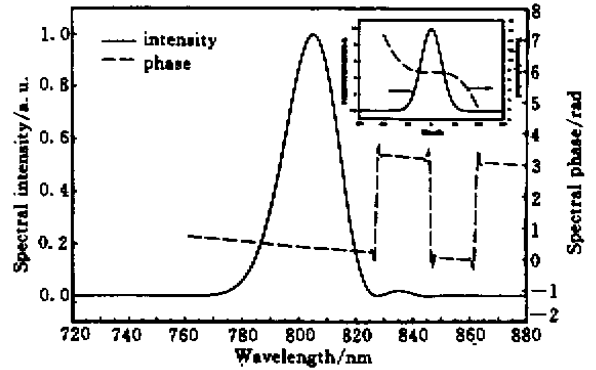


图5 重构的三阶位相啁啾脉冲的光谱位相及光谱
(插图为还原的时域脉冲强度包络及位相)

Fig.5 Spectral intensity and phase for the pulse with temporal cubic phase distortion. Inset: reconstructed temporal intensity profile and corresponding temporal phase of the pulse

脉冲形状与相位信息。

4 实验结果

根据 SPIDER 的测量原理,我们设计建成了一台 SPIDER 装置,并对一台飞秒激光器的输出脉冲进行了检测,还原出的脉冲形状与相位见图 6。对比数值模拟得到的同时含有二、三阶色散和自相位调制效应的脉冲形状与相位图见图 7,由图可知二者是完全相似的。这说明该激光器输出的脉冲带有混合型色散,而且形状已偏离双曲正割型。实验结果表明我们的 SPIDER 的设计和数值模拟是合理

的、可行的。

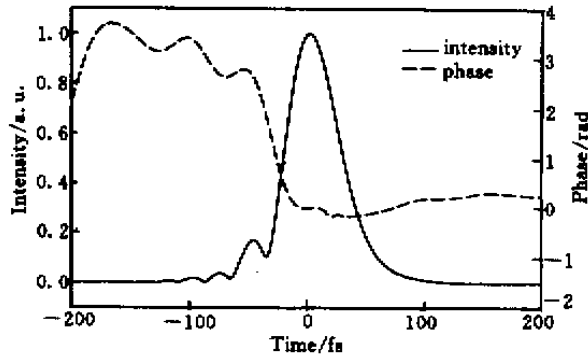


图6 用 SPIDER 获得的某钛宝石飞秒激光器输出的脉冲形状和相位

Fig.6 Temporal amplitude and phase from a femtosecond Ti:sapphire laser obtained with SPIDER

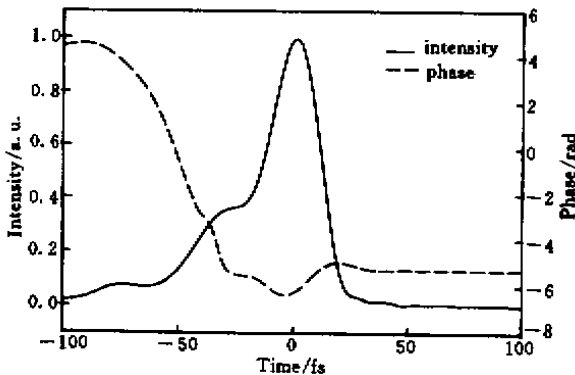


图7 用数值模拟方法重构出的含有二、三阶色散和自相位调制效应脉冲形状和相位

Fig.7 Temporal amplitude and phase for a pulse with the group delay dispersion, the third order dispersion and the self-phase modulation obtained with the numerical simulation

5 结 论

本文对用于测量飞秒光脉冲啁啾特性的光谱位相干涉仪(SPIDER)进行了设计和数值模拟。通过对含有不同啁啾的脉冲进行重构,都获得了准确还原的飞秒脉冲在谱域和时域的位相图。并与实验结果进行了比较,获得了很好的一致性。

致谢 作者感谢与美国纽约城市大学徐世祥博士的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 M. Nisoli, S. Stagira, S. D. Silvestri *et al.*. A novel-high energy pulse compression system: generation of multigigawatt sub-5-fs pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2): 189 ~ 196
- 2 D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9): 631 ~ 633
- 3 R. Ell, U. Morgner, F. X. Kärtner *et al.*. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 373 ~ 375
- 4 G. Steinmeyer, D. H. Sutter, L. Gallmann *et al.*. Frontiers in ultrashort pulse generation: pushing the limits in linear and nonlinear optics [J]. *Science*, 1999, **286**(5444): 1507 ~ 1512
- 5 T. M. Shuman, M. E. Anderson, J. Bromage *et al.*. Real-time SPIDER: ultrashort pulse characterization at 20 Hz [J]. *Optics Express*, 1999, **5**(6): 134 ~ 143
- 6 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
- 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. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-Transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156 ~ 160