

文章编号: 0258-7025(2003)01-0065-03

# 用 SPIDER 法测量 15 TW/35 fs 强激光系统的 脉冲输出特性

钏 晔, 王兴涛, 徐宏伟, 林礼煌, 李儒新, 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 利用光谱位相干涉直接重构光脉冲的方法(SPIDER),对最近建成的 15 TW/35 fs 台式掺钛蓝宝石超短超强激光系统的输出脉冲特性进行了测量。测量内容包括输出脉冲的相对位相分布和脉冲强度随时间的变化情况。结果显示,输出脉冲具有好的相对位相分布(各光谱之间相对位相差  $< 2\pi$ ),输出脉冲半高宽为 33 fs,表明此系统的脉冲输出已经达到了设计的要求。

**关键词** 激光技术;台式太瓦激光系统;光谱位相干涉直接重构法;位相;脉冲强度

**中图分类号** O 348.1;TN 248.1 **文献标识码** A

## Characterization of the Output of 15 TW/35 fs Intense Laser System by Using the Method of SPIDER

CHUAN Ye, WANG Xing-tao, XU Hong-wei,

LIN Li-huang, LI Ru-xin, ZHANG Zheng-quan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** By means of the method of SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electrical Reconstruction), the characteristics of the output of a 15 TW/35 fs table-top Ti:sapphire ultrashort ultraintense laser system have been measured, which include the phase and the time-depended intensity of the pulse. The results show that the output pulse of this system has good relative phase distribution (the phase difference between every two spectrums  $< 2\pi$ ), and the duration of the output pulse is 33fs. Consequently, the system has reached the aim of the design.

**Key words** laser technique; table-top terawatt laser system; SPIDER; phase; intensity of pulse

## 1 引言

近 10 年来,由 D. Strickland 等提出的啁啾脉冲放大(CPA)技术<sup>[1]</sup>被广泛应用于建造太瓦激光系统。由于掺钛蓝宝石具有良好的激光性质和热传导性,所以被广泛应用于建造 10 TW 以上的激光系统。中国科学院上海光学精密机械研究所在 1996 年建成了应用 CPA 技术的 2.8 TW/43 fs 掺钛蓝宝石激光系统<sup>[2]</sup>,然后在 1998 年将其升级为 5.4 TW/46 fs<sup>[3]</sup>。最近这台激光系统又被成功升级为 15 TW/35 fs。

在超短激光脉冲特性测量的领域中,能够完整

测量脉冲特性的方法主要有频率分辨光开关(FROG, Frequency Resolved Optical Gating)法<sup>[4]</sup>和光谱位相干涉直接重构(SPIDER)法<sup>[5]</sup>,在 FROG 法里,利用非线性效应,将待测光脉冲作为具有时间延迟特性的门脉冲,然后从一个二维的光斑中恢复出超短脉冲  $\tilde{E}(\omega) = \sqrt{I(\omega)} \exp[i\Phi(\omega)]$  的特性参数。这个光斑由具有不同时间延迟的门脉冲光谱所组成,而特性参数的恢复由一个循环的算法来完成。它的计算量比较大。SPIDER 法主要通过两次一维的傅里叶变化和一次滤波就能从一个干涉图中恢复出待测脉冲的位相信息,并进而得到脉

收稿日期:2001-10-26;收到修改稿日期:2002-02-28

作者简介:钏晔(1976.8—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所在读硕士研究生,主要从事超短激光脉冲的研究。

E-mail:chuanye@263.net

冲随时间变化的强度分布图。由于算法的简单性, SPIDER 可以对输出的超短光脉冲进行实时测量。

## 2 SPIDER 的原理

SPIDER 的基本原理是把待测光脉冲的位相分布通过光谱位相干涉的形式表现为空间干涉条纹的强度, 然后通过对干涉图的计算来得到脉冲的位相分布。

具体方法为: 将待测光脉冲分为两份, 其中一份经过展宽器展宽后, 成为啁啾脉冲, 另外一份通过另一个分束镜, 然后形成两个共线的, 但却存在一定时延  $\tau$  的光脉冲。将展宽脉冲和两个有时延  $\tau$  的脉冲聚焦到和频晶体里, 并让它们在晶体里重合为一个点, 那么在满足位相匹配的条件下, 能产生两个超短脉冲与展宽脉冲的不同频率薄片作用后的和频信号。这两个信号完全相同, 但在中心频率上产生了一定的移动, 光谱仪所记录下的它们的干涉结果为

$$D(\omega_c) = |\tilde{E}(\omega_c - \Omega)|^2 + |\tilde{E}(\omega_c)|^2 + 2|\tilde{E}(\omega_c - \Omega)\tilde{E}(\omega_c)| \times \cos[\Phi_\omega(\omega_c - \Omega) - \Phi_\omega(\omega_c) - \tau\omega_c] \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为两共线待测脉冲的时间延迟,  $\Omega$  为由于延迟  $\tau$  而产生的光谱剪切。图 1 为 SPIDER 的原理图。式(1)中包含了待测光脉冲的位相信息, 经过相对应的数据处理就可以得到所需要的光谱相对位相分布。

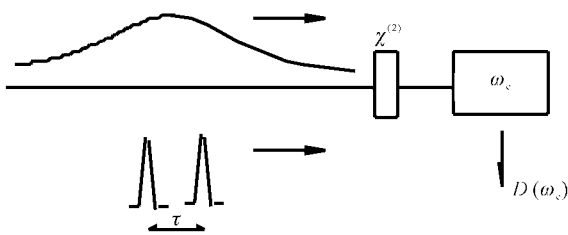


图 1 SPIDER 原理图

Fig. 1 Principle chart of SPIDER

## 3 实验结果及讨论

实验装置光路如图 2 所示, 穿过标准具的超短光脉冲分束经过展宽器展宽后成为啁啾脉冲; 另一束经过标准具前后表面反射后, 成为具有一定时延的, 并且共线的两个脉冲, 这里标准具的厚度为  $100 \mu\text{m}$ 。经过一系列全反镜后, 它们以平行的方向入射到聚焦镜 FM 上。和频晶体 SFG 位于 FM 的焦点处, 于是两束脉冲光在非线性晶体里聚焦为一个点,

这里使用的非线性晶体为  $100 \mu\text{m}$  厚的 BBO 晶体。在晶体里, 两个共线待测光脉冲与展宽脉冲的不同准单色频率薄片发生和频效应, 用光谱仪来接收这两个和频信号的干涉结果。

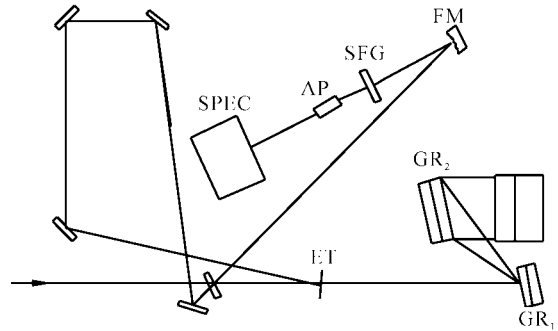


图 2 实验装置

SPEC: 光谱仪; AP: 光阑; FM: 聚焦镜;

GR<sub>1</sub>, GR<sub>2</sub>: 光栅; ET: 标准具

Fig. 2 Experimental setup for SPIDER

SPEC: spectrometer; AP: aperture; FM: focusing mirror;

GR<sub>1</sub>, GR<sub>2</sub>: gratings; ET: etalon

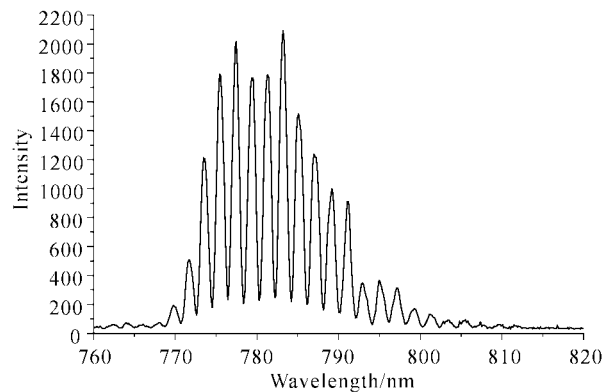


图 3 实验得到的 SPIDER 干涉图

Fig. 3 Experimental interferogram of SPIDER

图 3 为实验中光谱仪所记录的 SPIDER 信号干涉图, 它由一系列干涉条纹组成, 条纹之间是等间距的, 距离的大小与两个待测脉冲之间的时延  $\tau$  有关。

经处理后, 计算出的脉冲光谱位相分布如图 4 所示。由图 4 可知, 脉冲各频率之间的位相分布比较光滑,  $760 \text{ nm}$  与  $790 \text{ nm}$  波长光的位相差别不到一个光周期。图 5 为测得的超短激光脉冲光谱强度图, 带宽  $\Delta\lambda = 22 \text{ nm}$ 。由图 4 和图 5 重构的待测超短脉冲强度随时间的变化如图 6 所示, 由图 6 可知, 脉冲半高宽为  $33 \text{ fs}$ 。

由测量结果可知升级后的系统输出脉冲宽度已经达到了设计的指标, 在精密调整压缩光栅平行度时,  $35 \text{ fs}$  左右的脉冲能占到大多数, 说明了这一强

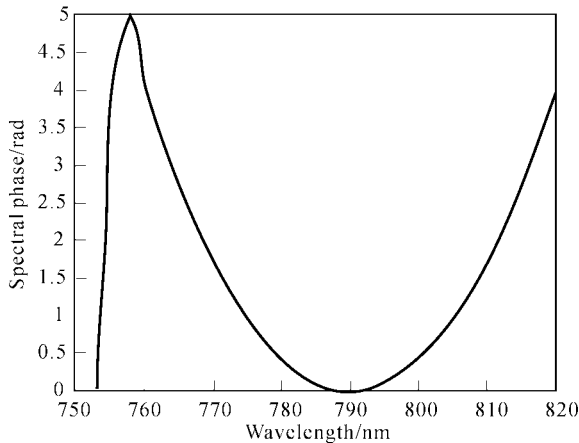


图 4 由图 3 所计算出的光谱位相图

Fig. 4 Calculated chart of spectral phase from Fig. 3

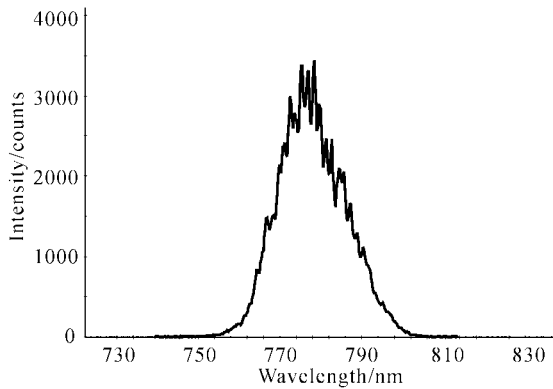


图 5 输出超短激光脉冲的光谱强度图

Fig. 5 Spectrogram of the output ultrashort laser pulse

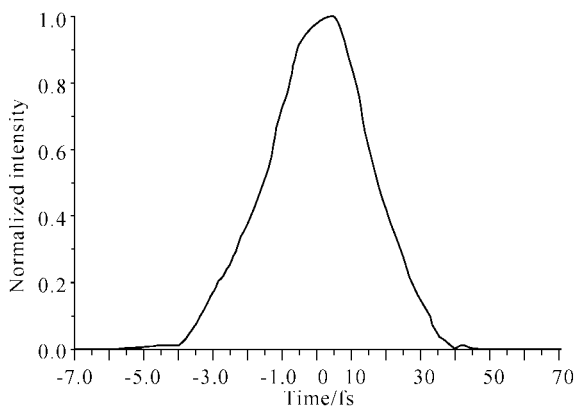


图 6 由图 4 和图 5 所重构的脉冲强度随时间变化图

Fig. 6 Reconstructed chart of time-dependent intensity from Fig. 4 and Fig. 5

激光系统输出的稳定性。另一方面,脉冲单次输出能量的测量结果 $>525$  mJ,所以其峰值功率已达到 15 TW。

作为对比,用单次自相关测量仪所测得的脉冲自相关曲线轮廓如图 7 所示。图中,  $\Delta T = 75 \mu\text{s}$ , 定标结果为  $0.73 \text{ fs}/\mu\text{s}$ , 所以脉冲自相关宽度为  $T = 54.75 \text{ fs}$ , 假设脉冲形状为双曲正割时, 脉冲半高宽为  $t = T/1.55 = 35.3 \text{ fs}$ , 这与用 SPIDER 所测到的结果相近。

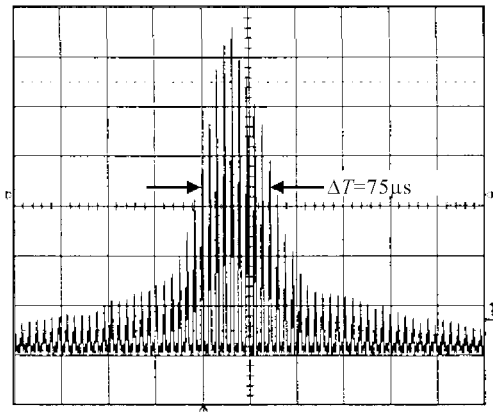


图 7 用自相关测量仪测量到的输出脉冲自相关曲线

Fig. 7 Autocorrelated curve of the output pulse by using the autocorrelator

### 4 结 论

用 SPIDER 法完整地测量了升级后掺钛蓝宝石超短超强激光脉冲的相对位相分布和脉冲的形状。SPIDER 系统展宽器允许测量到 20 fs 的脉冲。如果改进展宽器的参数,用它测量 10 fs 以下的激光脉冲是完全可能的。

### 参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Comm.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 Xu Zhi-zhan, Vigroux Luc, Saviot Frederic *et al.*. Ti:sapphire ultrashort pulses laser system with 2 TW/45 fs [J]. *Science in China (Ser. A)* (中国科学(A 辑)), 1997, **27**(7):640~645 (in Chinese)
- 3 Xu Zhi-zhan, Yang Xiao-dong, Vigroux Luc *et al.*. Mesa ultrashort-ultraintense Ti:sapphire laser system with 5.4 TW/46 fs [J]. *Science in China (Ser. A)* (中国科学(A 辑)), 2000, **30**(1):63~69 (in Chinese)
- 4 R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff *et al.*. Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(9):3277~3295
- 5 Chris Iaconis, Ian A. Walmsley. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 501~509