

文章编号: 0258-7025(2009)05-1175-05

光谱相位相干直接电场重构法测量飞秒脉冲的适用性问题

刘俊¹ 文锦辉¹ 张燕伟¹ 焦中兴¹ 雷亮² 黄志凌¹ 陈志峰¹ 赖天树¹

(¹中山大学物理科学与工程技术学院光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

²广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 分析了现有光谱相位相干直接电场重构法(SPIDER)系统的一个缺点,即需预先估计待测脉冲的特性,来设定合适的系统参数。因而其适用范围受到一定限制,特别是在测量啁啾脉冲时容易出现偏差。实验用 SPIDER 系统分别测量了钛宝石飞秒激光器输出的脉冲及其经 BK7 玻璃块展宽得到的啁啾脉冲,测得啁啾脉冲的宽度为 295 fs,作剪切量修正后测得脉宽为 322 fs,后者更接近理论预期的 313 fs。这表明 SPIDER 系统测量啁啾脉冲时,如果色散器提供的色散量不够大,会出现一定程度的偏差。通过补充记录两个和频脉冲的光谱,修正实际的剪切量,可有效减小误差,但问题仍未完全解决。

关键词 非线性光学; 光谱相位相干直接电场重构法; 啁啾脉冲; 飞秒脉冲; 测量

中图分类号 O433.5⁺4; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1175

Applicability Problem in Characterization of Femtosecond Pulses with Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction

Liu Jun¹ Wen Jinhui¹ Zhang Yanwei¹ Jiao Zhongxing¹ Lei Liang²
Huang Zhiling¹ Chen Zhifeng¹ Lai Tianshu¹

¹State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China
²Faculty of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract We focus on a defect that often occurs in spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction(SPIDER) systems; the features of the measured pulse should be predicted properly so as to adjust suitable parameters for the phase retrieval. This defect actually makes some limitations to the applicability of these systems. Errors occur likely when chirped pulses are to be measured. To prove this, we set up a conventional SPIDER system to measure the femtosecond pulses from a Ti:sapphire laser and the chirped pulses resulted from the broadening of a BK7 glass block. The duration of the chirped pulse is 295 fs, while 322 fs is obtained after spectral shear correction. The latter is closer to theoretically predicted value of 313 fs. The experimental results show that errors do occur when the measured pulse has obvious chirp, yet not enough dispersion is offered by the broadening unit of the SPIDER system. However, this error can be decreased by calibrating the spectral shear by means of recording the spectra of the upconverted pulses.

Key words nonlinear optics; spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction; chirped pulse; femtosecond; measurement

收稿日期: 2008-08-06; 收到修改稿日期: 2008-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(10674184 和 60678009)资助课题。

作者简介: 刘俊(1984—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲的诊断等方面的研究。E-mail:liujun19841017@yahoo.com.cn

导师简介: 文锦辉(1964—),男,博士,副教授,主要从事飞秒脉冲的产生与测量以及超快激光光谱学等方面的研究。

E-mail: wenjh@mail.sysu.edu.cn

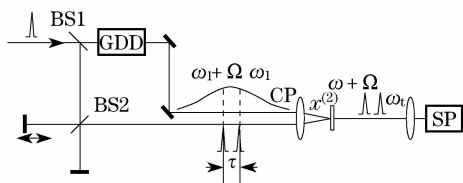
1 引 言

光谱相位相干直接电场重构法 (SPIDER)^[1] 已成为测量飞秒脉冲的主流方法之一。相比其他方法, SPIDER 方法需采集的数据量少, 只要测量两个光谱就可重构脉冲的特性, 且反演算法简单, 不需迭代计算, 处理数据速度快, 适于实时监测, 具有单脉冲测量特性^[2~4]。然而, 现有的 SPIDER 系统需要对待测脉冲的特性 (特别是脉冲的宽度和啁啾情况) 作出估计, 以便能设定合适的系统参数, 从而准确地还原脉冲的相位^[1,5~9]。一旦待测脉冲的特性超出预估的范围, 会出现一定程度的偏差, 这在测量啁啾脉冲时比较容易出现。

基于 SPIDER 重构脉冲相位的基本理论^[1], 本文分析了现有 SPIDER 系统的适用性问题; 在实验上建立了 SPIDER 脉冲测量系统, 测量了钛宝石飞秒激光器输出的脉冲及其经色散展宽得到的啁啾脉冲。结果表明, SPIDER 在重构啁啾脉冲的相位时容易出现误差, 而采取必要的修正措施可有效地减小这种误差。

2 理论分析

传统 SPIDER 脉冲测量系统如图 1 所示。待测的飞秒脉冲经分束片分成两束, 一束经过一个迈克尔孙干涉仪转变成为两个相互延时时为 τ 的复制脉冲; 另一束经过一个色散器展宽 100 倍以上, 变为一个强烈啁啾的脉冲 CP。然后, 两个复制脉冲分别与啁啾脉冲 CP 的两个准单色成分在非线性晶体内发生和频作用, 生成两个频谱剪切的和频脉冲。借助这两个和频脉冲在光谱仪 SP 内的光谱干涉, 可求出待测脉冲的相位曲线, 最终得出该脉冲的全部信息。



BS1 and BS2: beam splitter; GDD: dispersive implement; $\chi^{(2)}$: sum-frequency crystal; SP: spectrometer

图 1 SPIDER 装置示意图

Fig. 1 Schematic of SPIDER apparatus

色散器一般选用两种形式: 光栅对结构, 其优点是适用范围较广, 对待测脉冲的圆频率带宽 $\Delta\omega$ 和脉宽 τ_p 的限制小。但由于脉冲要经过 4 次光栅反射, 能量将损失 60% 以上, 导致和频的效率较低, 这会影响到脉冲相位测量的精度。因此该结构多用于功率较高的飞秒脉冲的测量; 一段长 10 cm 左右的

高色散玻璃块 (常用重火石玻璃), 让光束通过一次或多次, 其优点是可降低能量损失, 但一般只适用于 $\Delta\omega \geq 30$ nm 脉冲的测量。

为保证脉冲相位重构的准确性, SPIDER 系统在参数设置上需满足以下要求^[1]: 啁啾脉冲 CP 参与和频的两个准单色成分的带宽 $\delta\omega \leq \Delta\omega/100$, 而它们的圆频率差 Ω (称为光谱剪切量) 为 $\Delta\omega$ 的 5%~10%。

由图 1 可知, Ω , τ 和啁啾脉冲 CP 的二阶色散 φ''_{ch} 之间的约束关系为

$$\Omega = \tau/\varphi''_{ch}, \quad (1)$$

实际上, φ''_{ch} 是由待测脉冲本身的二阶色散 φ''_p 以及色散器提供的二阶色散 φ''_g 两部分组成的, 即

$$\varphi''_{ch} = \varphi''_p + \varphi''_g, \quad (2)$$

由于在脉冲测量前 φ''_p 还是未知的, 因此一般需设定足够大的 φ''_g , 使得 $\varphi''_p \ll \varphi''_g$, 从而 φ''_p 可忽略不计, 于是光谱剪切量可由 $\Omega = \tau/\varphi''_g$ 确定。

同理可得

$$\delta\omega = \tau_p/\varphi''_{ch} \approx \tau_p/\varphi''_g, \quad (3)$$

即 $\delta\omega$ 与待测脉冲的宽度 τ_p 有关。但测量前 τ_p 也是未知量, 因此需预估 τ_p 的大小, 从而为色散器设定足够大的 φ''_g 。通常的做法是根据 $\Delta\omega$ 的大小来估计脉宽 τ_p 的取值范围: 假设 τ_p 不超过其转换极限宽度 (约 $\pi/\Delta\omega$) 的 4 倍, 于是取 $\varphi''_g \approx 400\pi/(\Delta\omega)^2$ 。

从分析可见, SPIDER 系统 (包括 ZAP-SPIDER 系统^[3]) 需预先估计待测脉冲的特性, 然后设定合适的 φ''_g 和 τ 值, 使得脉冲相位重构的要求得到满足。通常 φ''_g 设定后就不再作调整 (尤其是用长玻璃块作色散器时, 调整 φ''_g 更加不易), 这实际上就限定了 SPIDER 系统的适用范围, 即只适用于测量时间带宽积 $T_{BP} = \Delta\omega \cdot \tau_p \leq 2$ 的脉冲。但在实际应用中, 不是每次都能正确预测待测脉冲的特性的。一旦待测脉冲的特性超出预估的范围, 特别是待测脉冲有明显的啁啾, 脉冲重构就会出现偏差。一方面, 若 $\delta\omega \leq \Delta\omega/100$ 的条件不再满足, 则表示啁啾脉冲 CP 参与和频的两个片段不能看作是准单色的, 它们与复制脉冲相互作用所产生的和频脉冲, 其相位结构与待测脉冲相比将出现一定程度的偏离, 这样经由光谱干涉得到和频脉冲的相位曲线, 并不能完全等同于待测脉冲的相位曲线; 另一方面, 若 φ''_p 与 φ''_g 相比不能忽略, 使得实际的剪切量 Ω 并不等于 τ/φ''_g , 而等于 $\tau/(\varphi''_g + \varphi''_p)$, 则在重构出脉冲的相位差曲线后, 用串联方法获得脉冲的相位曲线时, 将因串联间隔与实际间隔不符而出现误差。当然, 为色散器预设一个很大的 φ''_g 值, 可扩大 SPIDER

系统的适用范围,从而降低出现误差的几率,但这意味着啁啾脉冲 CP 被强烈展宽,峰值强度大大降低。在测量较窄的脉冲时,复制脉冲只能与占 CP 很小比例的片段发生和频,因而和频效率将很低,系统的信噪比就低,脉冲相位重构的精确度就受限制。

3 实验结果与讨论

建立了如图 1 所示的 SPIDER 系统,用于测量自建的钛宝石激光振荡器输出的飞秒脉冲。其中,测量系统以一块长度为 100 mm 的 ZF10 玻璃作为色散器,光束通过该玻璃块两次,可获得 $\varphi''_g = 27504 \text{ fs}^2$ 的色散展宽。待测飞秒脉冲的中心波长 $\lambda_0 = 792 \text{ nm}$,重复率 95 MHz,带宽 $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ (即 $\Delta\omega = 2\pi \cdot 14.3 \text{ THz}$),平均功率 460 mW。在测量系统中两个复制脉冲与啁啾脉冲 CP 在 $150 \mu\text{m}$ 厚

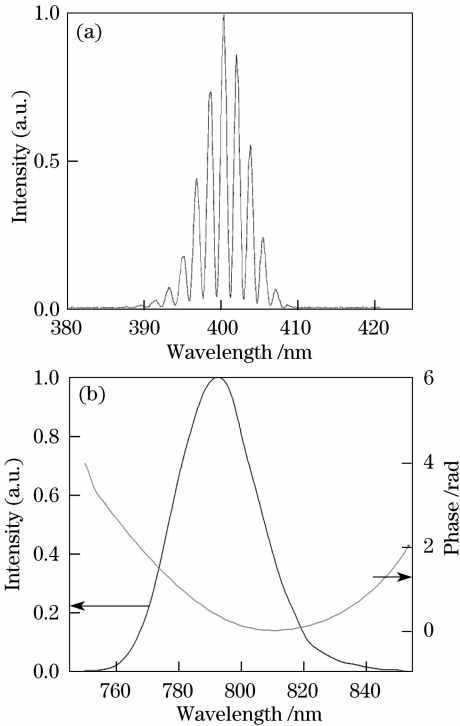


图 2 SPIDER 系统测得的干涉谱和重构出的相位曲线
(a) SPIDER 干涉光谱图;(b) 飞秒脉冲的光谱强度曲线及重构的相位

Fig. 2 Experimental measured SPIDER interferogram and retrieved phase. (a) SPIDER interferogram; (b) measured spectrum and retrieved phase of the measured pulse

的 BBO 晶体中实现 II 类匹配和频。由光栅光谱仪记录和频脉冲的干涉光谱,如图 2(a) 所示。经校正得 $\tau = 301.68 \text{ fs}$, $\Omega = 2\pi \cdot 1.87 \text{ THz}$,利用反演算法^[1]得到脉冲的相位曲线见图 2(b)。

结合待测脉冲的光谱强度曲线(也见图 2(b)),可求出该脉冲在时域上的强度包络和相位曲线(见图 3(a)),可知该脉冲的宽度 $\tau_p \approx 45 \text{ fs}$,并有少量的啁啾,说明飞秒激光器的色散补偿未达最佳。用相干自相关法测量了该脉冲,并与由 SPIDER 重构的脉冲特性所预期的相干自相关曲线作对比,如图 3(b) 所示。可见两者基本吻合,表明在当前的参数条件下,该系统的测量准确度较高。利用公式(3)可计得 $\delta\omega = 2\pi \cdot 0.27 \text{ THz}$,接近 $\delta\omega \leq \Delta\omega/100$ 的要求($\delta\omega$ 为 $\Delta\omega$ 的 1.4%)。

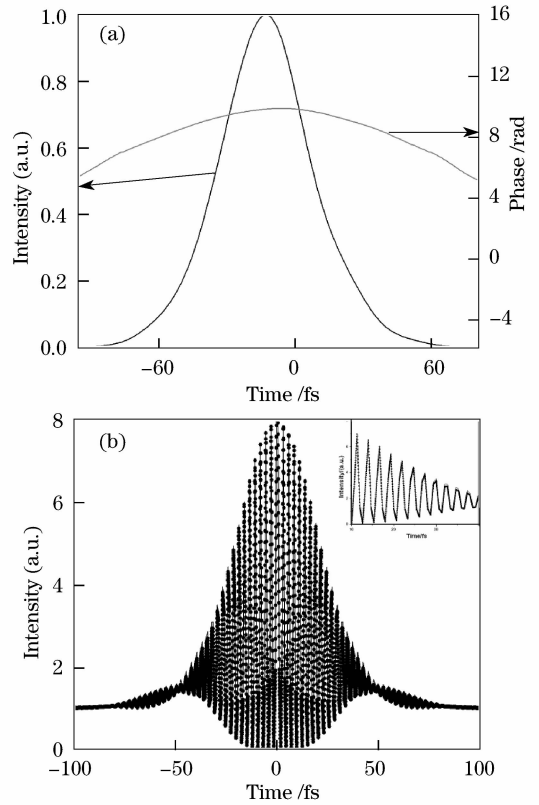


图 3 重构脉冲时域信息及其准确性验证。(a) 重构出的脉冲的时域强度包络和相位曲线;(b) 实测的与 SPIDER 预期的自相关曲线的比较

Fig. 3 Retrieved pulse information in time domain and accuracy studied. (a) pulse profile and phase in time domain; (b) comparison between the measured interferometric autocorrelation trace with that predicted by SPIDER

然后,让上述飞秒脉冲透过一块 80 mm 长的 BK7 玻璃,展宽成为啁啾脉冲,并作为测量的对象。由 BK7 玻璃块引入的色散,使得 $\varphi''_p \approx 3600 \text{ fs}^2$ 。由于 $\varphi''_p/\varphi''_g \approx 0.13$,显然 φ''_p 不能忽略不计,它将引起光谱剪切量的改变。为了证明这一点,在 φ''_g 和 τ 保持不变的情形下,分别测量了飞秒脉冲展宽前后进入 SPIDER 系统所生成的两个和频脉冲的光谱,

如图 4 所示。可见,对应于展宽后的待测啁啾脉冲的两个和频脉冲之间的光谱剪切量 Ω' ,确实要比原来的 Ω 值缩小了,即由原来的 $2\pi \cdot 1.87$ THz 缩小为 $2\pi \cdot 1.56$ THz,并符合 $\Omega'/\Omega = 1 - \varphi''_p/\varphi''_g$ 的关

系。但问题是 SPIDER 系统在完成了剪切量和延时校正的操作步骤并投入使用后,一般不需再测量单个和频脉冲的光谱,而只需记录它们的干涉谱,因此不易察觉剪切量是否发生了改变。

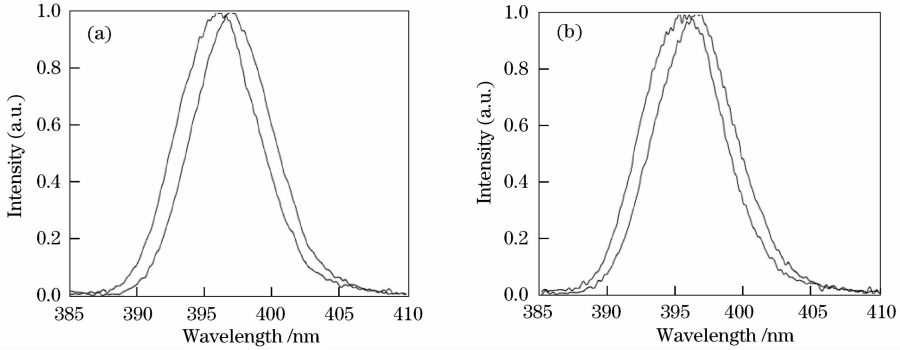


图 4 飞秒脉冲被展宽前后分别对应的和频脉冲对的光谱。(a)展宽前;(b)展宽后

Fig. 4 Spectra of the upconverted pulse pair. (a) before broadening; (b) after broadening

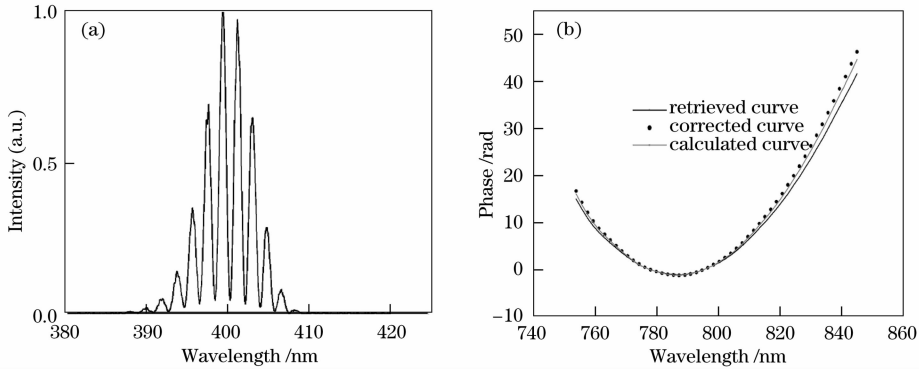


图 5 SPIDER 系统测得的啁啾脉冲干涉以及相位比较。(a)啁啾脉冲的干涉光谱;(b)理论预期的啁啾脉冲的相位曲线,以及分别用 Ω 和 Ω' 重构出的相位曲线

Fig. 5 Experimental measured SPIDER interferogram of chirped pulse and phase comparison. (a) interferogram of the chirped pulse; (b) calculated phase (gray line), and retrieved phases with Ω (black line) and Ω' (dot line) of the chirped pulse

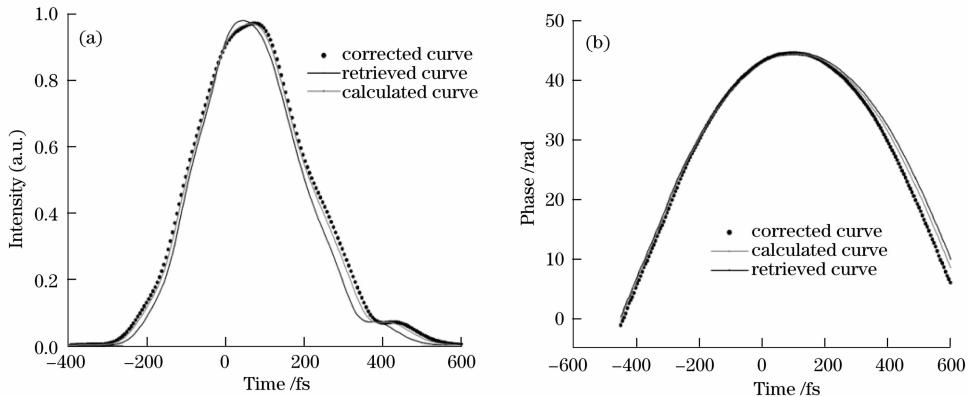


图 6 理论预期的以及分别由 Ω' 和 Ω 重构出的啁啾脉冲的时域曲线。(a)强度包络;(b)相位曲线

Fig. 6 Calculated curve (gray line), and retrieved curves respectively with Ω' (dot line) and Ω (black line) of the chirped pulse. (a) the intensity profile; (b) the phase

在上述条件下得到的待测啁啾脉冲对应的 SPIDER 干涉光谱见图 5(a)。分别采用 Ω 和 Ω' 来反演计算出啁啾脉冲的相位曲线,可见两者之间存

在明显的差异(见图 5(b))。由于 BK7 玻璃块的色散特性是可知的,因此可直接计算上述飞秒脉冲通过 BK7 玻璃块后得到的啁啾脉冲的相位曲线。可

见,用 Ω' 来重构脉冲的相位曲线,要比用 Ω 求得的曲线更接近理论预期的结果。上述三种情况分别得出的啁啾脉冲的时域特性如图 6 所示,对应的脉冲宽度分别为 295 fs, 313 fs 和 322 fs。这说明由于实际剪切量发生了变化,导致脉冲重构出现明显的偏差。若能补充测量两个和频脉冲的光谱,对实际剪切量进行修正,则可有效减小重构误差。然而,由(3)式可算得 $\delta\omega = 2\pi \cdot 2.12$ THz,明显不符合 $\delta\omega \leq \Delta\omega/100$ 的要求,因而脉冲测量的准确性仍然受到限制。

4 结 论

分析了现有 SPIDER 系统的一个缺点,即需要预先估计待测脉冲的特性,设定合适的系统参数,因而其适用范围受到一定限制。一旦待测脉冲的特性超出预估的范围,会出现一定程度的偏差,这在测量啁啾脉冲时较容易出现。为了证明上述观点,建立了 SPIDER 系统,测量了钛宝石飞秒激光器输出的脉冲以及经色散展宽得到的啁啾脉冲。结果表明,SPIDER 在重构啁啾脉冲的相位时,如果色散器引入的色散量不够,会出现一定程度的偏差。通过补充记录两个和频脉冲的光谱,可对实际的剪切量作出修正,从而有效减小这种误差,但由于准单色性的要求难以达到,测量准确度仍然受限。

我们认为,通过优化 SPIDER 的光学结构,切断 Ω 和 $\delta\omega$ 与待测脉冲特性的关联性,应能克服上述缺点,从而可扩大 SPIDER 测量系统的适用范围。我们打算建立一个等效的 ZAP-SPIDER 光学结构^[3],采用两个频率差为 Ω 的准单色脉冲与单个复制脉冲和频的方式。

参 考 文 献

- 1 C. Iaconis, I. A. Walmaley. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1999, **35**:501~509
- 2 C. Dorrer. Implementation of spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction with a simultaneously recorded reference interferogram [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**:1532~1534
- 3 P. Baum, S. Lochbrunner, E. Riedle. Zero-additional-phase SPIDER: full characterization of visible and sub-20-fs ultraviolet pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**:210~212
- 4 L. Gallmann, D. H. Sutter, N. Matuschek *et al.*. Techniques for the characterization of sub-10-fs optical pulses: a comparison [J]. *Appl. Phys.*, 2000, **B70**:S67~S75
- 5 Wang Peng, Wang Zhaohua, Wei Zhiyi *et al.*. Measurement of spectral phase of femtosecond laser pulse using SPIDER technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**:3004~3009
王 鹏,王兆华,魏志义等.用 SPIDER 方法测量飞秒激光脉冲的光谱相位[J]. *物理学报*, 2004, **53**: 3004~3009
- 6 Wen Jinhui, Lei Liang, Jiao Zhongxing *et al.*. Comparison between two kinds of spectral phase interferometry on the accuracy of characterization of complex pulses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**: 1883~1888
文锦辉,雷 亮,焦中兴等.两种光谱相位相干电场重构法对复杂脉冲测量的准确度的比较[J]. *物理学报*, 2006, **55**: 1883~1888
- 7 Chai Lu, Gao Feng, Wang Qingyue *et al.*. Numerical experiment and analysis for characterizing femtosecond pulses with SPIDER [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 739~742
柴 路,高 峰,王清月等.飞秒激光光谱位相干涉仪的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):739~742
- 8 Wen Ruhong, Liu Tianfu. Optimization of parameters on reconstruction of phase of femtosecond laser pulse with SPIDER [J]. *J. Applied Optics* 2006, **27**:340~343
文汝红,刘天夫.用 SPIDER 法重构飞秒脉冲位相参数的选择[J]. *应用光学*, 2006, **27**:340~343
- 9 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