

光谱位相干涉仪参数的优化选取^{*}

柴 路¹⁾ 何铁英¹⁾²⁾ 杨胜杰¹⁾ 王清月¹⁾ 张志刚¹⁾

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

²⁾ (天津大学理学院, 天津 300072)

(2002 年 11 月 27 日收到 2003 年 3 月 7 日收到修改稿)

模拟研究了光谱位相干涉直接电场重构法的三个主要参数 时间延迟 τ 、频率剪切量 Ω 和展宽器色散 ϕ 之间的相互关系. 研究表明 不同的待测脉冲, 具有不同的最佳时间延迟 τ 而 τ 的改变所引起的 Ω 的改变又限制了 τ 的选取范围 在此情况下只有适当调整 ϕ 才能在 τ 的较宽的范围内保证测量精度.

关键词: 光谱位相干涉直接电场重构法, 飞秒脉冲测量, 光谱干涉

PACC: 4265R, 4260F

1. 引 言

随着飞秒脉冲激光技术的发展和应用领域的扩大, 对飞秒脉冲的产生、放大、传输和整形特性的理论和实验研究更加深入^[1,2]. 不论在基础研究和应用实践中, 对飞秒脉冲时空特性的诊断都是十分重要的. 因此, 飞秒脉冲的测量技术已经成为促进飞秒激光技术发展的关键技术之一. 自 20 世纪 90 年代中期以来, 人们已经发展了几种能够对飞秒脉冲进行全面诊断的测量技术, 如频率分辨光学开关法 (FROG)^[3]、光谱和时间分辨上转换法 (STRUT)^[4]、光谱位相干涉直接电场重构法 (SPIDER)^[5]、交叉位相调制法 (XPM)^[6] 和时间分辨光学开关法 (TROG)^[7] 等. 但是, 在飞秒脉冲测量技术中, 国际上目前仍然是 FROG 和 SPIDER 的两分天下^[8]. 与其他方法相比, 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, 尤其是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^[9]. 然而, 通过理论和实验研究发现^[10], SPIDER 的测量精度与三个主要参数 时间延迟 τ 、频率剪切量 Ω 和展宽器色散 ϕ 有密切关系. 因此, 如何选取最佳控制参数, 确定合理的测量范围是减小测量误差的关键.

本文基于 SPIDER 还原飞秒脉冲电场的基本理

论, 通过进行数值模拟, 重点研究了以上三个参数之间的关系, 以及它们对测量误差的影响. 特别是确定出对于不同宽度的脉冲最佳 τ 的选取范围, 以及展宽器色散 ϕ 对 SPIDER 测量范围的限制. 这对于实际测量有直接指导意义.

2. SPIDER 的基本理论

2.1. SPIDER 装置的原理

图 1 是 SPIDER 装置的原理图^[11]. 首先, 待测脉冲进入 SPIDER 装置后, 经分束镜分为两路. 其中的一路再经迈克尔孙干涉仪分为两束完全相同的具有时间延迟 τ 的脉冲, 另一路脉冲经展宽器展宽, 赋予线性的正啁啾. 然后, 脉冲对与被展宽 (啁啾) 脉冲同时进入非线性晶体进行频率上转换, 由于时间延迟 τ 及啁啾的存在, 使得两束脉冲与展宽脉冲在不同的频率上和频, 因此, 两束脉冲和频后在频域产生一个频差, 被称为光谱剪切量, 用符号 Ω 表示. 在这里, 非线性频率合成模拟了一个线性时间位相调制器. 最后, 光谱仪记录下带有光谱剪切量 Ω 的脉冲对的干涉谱. 再将干涉谱输入到计算机中, 并用 SPIDER 的反演算法处理就可以得到入射脉冲的光谱位相.

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 60178007), 天津市自然科学基金 (批准号 003800611), 国防预研基金 (批准号 03JW1401), 国家重点基础研究专项经费 (批准号 G1999075201-2), 教育部高等学校骨干教师资助计划资助的课题.

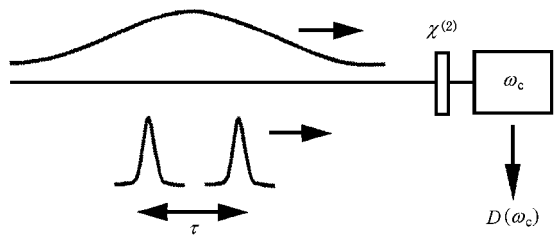


图1 SPIDER 装置原理图

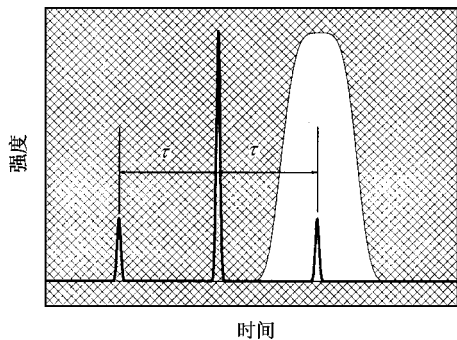


图3 光谱干涉图的傅里叶变换及滤波

2.2. SPIDER 重建位相的反演算法

图2是模拟的光谱剪切干涉图,条纹间隔为 $2\pi/\tau$,其数学表达式为^[11]

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

$$\Omega = -\tau/2\ddot{\varphi}. \quad (2)$$

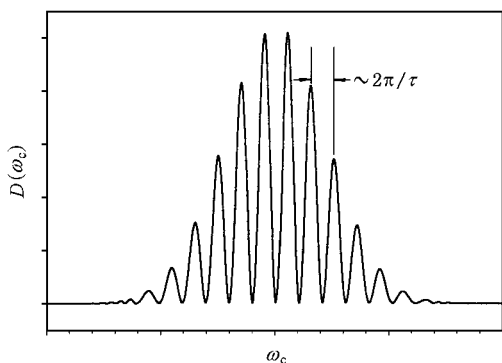


图2 模拟的光谱剪切干涉图

$D(\omega_c, \tau)$ 是一个标准的光谱剪切干涉图的表达式,其中 Ω 是光谱剪切量, τ 为两脉冲之间的时间延迟, $\ddot{\varphi}$ 为展宽器的二阶色散。 $\tilde{E}(\omega_c - \Omega)$ 和 $\tilde{E}(\omega_c)$ 是输入脉冲对的频域振幅。(1)式中的前两项是时域 $t=0$ 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。其中 $\omega_c\tau$ 是干涉条纹的快变部分,为线性项。

对此干涉谱进行傅里叶变换,将直流分量与交流分量分离。其中,直流分量以0为中心,正交流分量与负交流分量分别以 τ 及 $-\tau$ 为中心。再采用滤波技术,将正(负)的交流分量滤出,这个分量含有需要的位相信息。整个过程如图3所示。

对得到的交流分量进行一次反傅里叶变换,再对其取幅角,就得到位相项

$$\varphi_\omega(\omega_c - \Omega) - \varphi_\omega(\omega_c) - \tau\omega_c,$$

然后减去线性项 $\tau\omega_c$,就得到一系列的位相差

$$\theta(\omega_c) \equiv \varphi_\omega(\omega_c) - \varphi_\omega(\omega_c - \Omega). \quad (3)$$

由此,通过位相连接,重构出以光谱剪切量 Ω 为间隔的光谱位相。对重构的光谱位相及强度再做傅里叶变换就还原出待测脉冲的时域位相及振幅。

3. 光谱位相干涉仪参数的优化选取

在SPIDER装置的设计中,三个参数的选取极为重要。脉冲对的时间延迟 τ ,光谱剪切量 Ω 及展宽器的二阶色散 $\ddot{\varphi}$ 。 τ 与 Ω 均有各自的限制条件,而且两者通过(2)式与展宽器色散联系在一起。因此,这三个参数互相之间是关联的。

首先,图2中干涉谱的间隔为 $2\pi/\tau$,光谱仪的分辨率限制了 τ 值不能太大;图3中的正交流分量以 τ 为中心,为了保证滤波过程中与直流分量的充分分离, τ 值又不能太小。同样在频域,对于 Ω ,Nyquist采样极限对位相采样间隔的限制要求 Ω 不能太大,同样, Ω 也不能太小,使得光谱位相差无法分辨。此外,SPIDER还原算法要求脉冲对中的每个脉冲和啁啾脉冲的单一频率成分进行和频,因此啁啾脉冲相对于待测脉冲来说要足够宽,即展宽器色散量要足够大,以保证尽量符合该假设的理想条件。

在数值模拟中,考虑中心波长为800nm的高斯型脉冲。展宽器由一块1200线/mm的光栅和直角反射镜组成,二者距离为5cm,光束被光栅反射4次,提供的色散量为 $3.46 \times 10^5 \text{ fs}^2$ 。首先,我们对脉宽 $t_{in} = 20 \text{ fs}$ 的脉冲,选取不同的时间延迟 τ ,分别模拟计算出对应的光谱剪切干涉谱,再采用SPIDER反演算法分别对其光谱位相进行还原,并重构出脉冲的时域形状。然后,将对应不同 τ 值获得的位相曲线与原脉冲的位相曲线相比较,或者将对应不同 τ 值

获得的还原脉冲电场振幅(宽度)与原脉冲的电场振幅(宽度)进行比较,确定出误差.图4(a),(b)分别表示对于脉冲宽度 20fs 的输入脉冲,取不同的 τ 值时所对应重构脉冲宽度相对于原输入脉冲宽度的误差曲线和光谱位相曲线.从图4(a)中可见,在大约 900—2000fs 之间误差都小于 3%,说明 τ 的取值存

在一个范围.对于 20fs 的无啁啾脉冲的最佳 τ 的取值为 1310fs.由图4(b)中曲线说明,取最佳 τ 值($\tau = 1310\text{fs}$)时重构的光谱位相曲线在脉冲频谱范围内是一条水平直线,与原脉冲的位相曲线相吻合,而偏离最佳 τ 值对应的重构的光谱位相曲线是弯曲的,已经导致了还原误差.

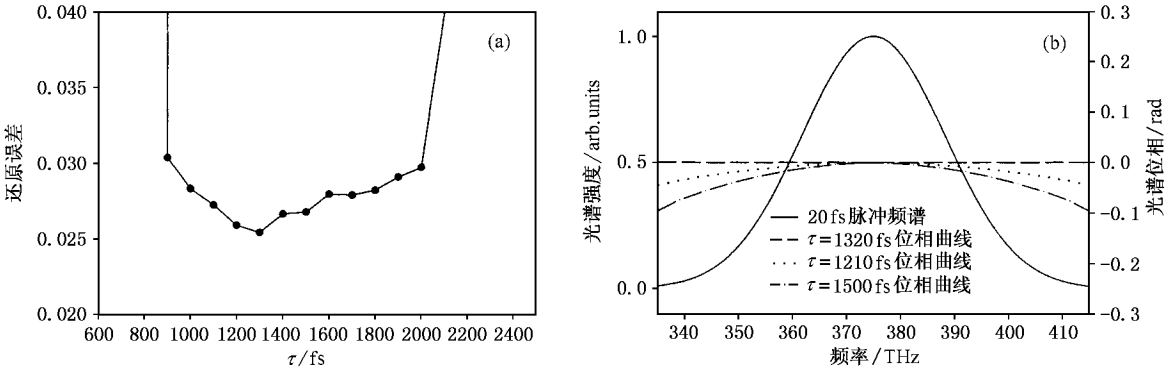


图4 τ 的选取对重构脉冲的影响 (a) 重构脉宽误差与 τ 的关系.(b) 重构脉冲光谱位相与 τ 的关系

其次,我们计算了不同输入脉宽,对应的最佳 τ 的取值范围,结果见图5.脉冲宽度从 20fs 变换到 70fs,随着脉宽的逐渐增大,对应的最佳时间延迟 τ 也同步增大,二者几乎呈现线性上升关系.但是,当脉冲宽度大于 70fs 时,对应的最佳 τ 值出现大幅下降,这是明显不合理的.对此我们的解释如下:随着脉冲宽度的增加,构成脉冲对的时间延迟 τ 必然增大,以保证两个脉冲的分离.而这就要求与脉冲对进行和频的第三个啁啾脉冲也要加宽,以保证完全包容脉冲对,并使其尽量符合前面所述的频率剪切时的理想单频假设条件.然而,根据脉冲在群速度色散 ϕ 作用下(展宽器)的展宽公式: $t_{\text{out}} = [1 + a_0 \phi^2 / (t_{\text{in}})^4]^{1/2} \cdot t_{\text{in}}^{[12]}$,其中 t_{in} 为输入脉冲宽度, t_{out} 为输出脉冲的宽度, a_0 是传输常数.我们可以看出随着输入脉冲宽度的增加,输出脉冲的展宽量却在逐步减小,这与上述所要求的相矛盾.因此,如果在色散量 ϕ 保持不变时,展宽器提供给啁啾脉冲的展宽量就会随着待测脉冲宽度的增加而减小,从而导致啁啾脉冲与脉冲对进行和频时获得的频率剪切量 Ω 必有一个最佳选取范围.根据(2)式, ϕ 一定时, Ω 正比于 τ .所以,随着 τ 不断上升, Ω 也在不断增大,当 Ω 的值超过了与该啁啾脉冲对应的最佳取值范围时,则导致测量失效.由此说明,在开始选取的展宽器色散量 ϕ 的条件下,该 SPIDER 的有效测量范围只能

是 20—70fs.若要增大其测量范围,就要增加展宽器的色散量,以满足 SPIDER 的和频条件.

为了验证此问题,我们从 70fs 开始,随着脉宽的增加,适当加大色散量 ϕ ,以保证 Ω 值尽量维持恒定,图6表示对于输入脉冲宽度大于 70fs 后,对展宽器色散量 ϕ 进行修正的曲线.

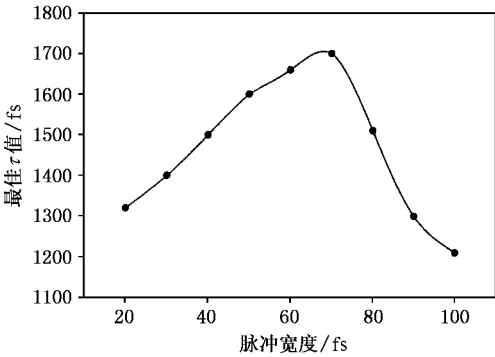


图5 不同输入脉宽的最佳 τ 值曲线

采用图6的修正后的色散量,对脉宽大于 70fs 的待测脉冲重新确定最佳 τ 值的范围,得到的脉宽与对应的最佳 τ 值曲线如图7所示.可以看出,对色散量进行修正后,SPIDER 对输入脉冲的有效测量范围明显得到了加宽.结合图6和图7,可以根据脉冲宽度确定出最佳控制参数的选择范围.值得指出的是,实际中的 SPIDER 提供的色散量往往是固定的

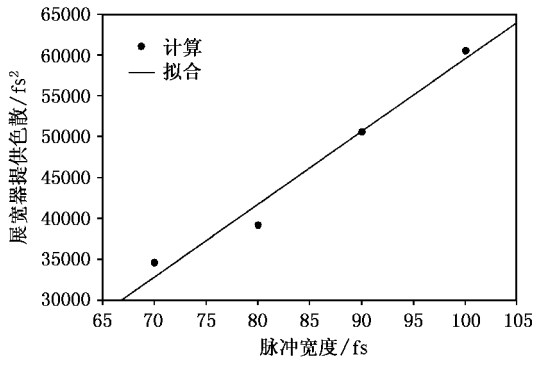


图 6 测量较宽脉冲的展宽器色散修正曲线

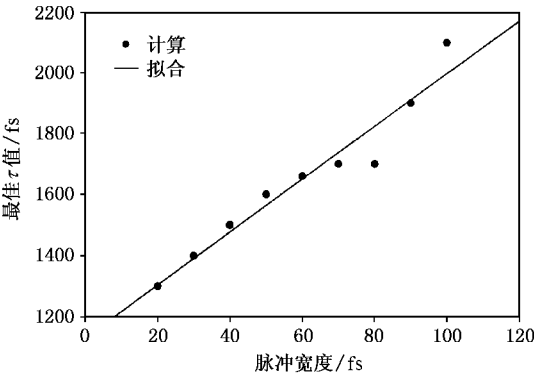


图 7 采用修正色散后的最佳 τ 值与脉冲宽度的关系曲线

或者非连续可调谐,因此,在 SPIDER 使用中必须注意该装置的有效测量范围和选取最佳的控制参数,以保证较高的测量精度.

4. 结 论

通过对光谱位相干涉仪(SPIDER)的数值模拟,发现了其中三个主要控制参数 时间延迟 τ 、频率剪切量 Ω 和展宽器色散之间的相互关系,以及这些参数的选取对 SPIDER 测量精度的影响.研究结果表明,当展宽器色散 ϕ 和脉冲宽度一定时,脉冲对的时间延迟 τ 存在一个最佳取值范围(范围大小视误差标准而定).该最佳取值范围的 τ 值随着脉冲宽度的增加而增大.为保证与 τ 关联的频率剪切量 Ω 维持在合频条件下的有效取值范围内,展宽器色散 ϕ 也必须随之适当增加,否则将导致测量误差加大和不确定性.在实际应用中,SPIDER 中的展宽器色散 ϕ 经常是不可调的或者是非连续可调的,因此,其测量脉冲宽度的有效范围是有限制的.

[1] Zhang Z G *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1080(in Chinese) [张志刚等 2001 *物理学报* **50** 1080]

[2] Chai L *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 68(in Chinese) [柴路等 2001 *物理学报* **50** 68]

[3] Kane D J, Trebino R, 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 571

[4] Rhee J K, Sosnowski T S, Tie A C *et al* 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1780

[5] Iaconis C, Walmsley I A 1998 *Opt. Lett.* **23** 792

[6] Lange H R, France M A, Ropoche J F *et al* 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **4** 295

[7] Koumans R, Yariv A 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 137

[8] Chai L *et al* 2002 *J. of Optoelectronics · Laser*, **13** 647 (in Chinese) [柴路等 2002 *光电子·激光* **13** 647]

[9] Shuman T M, Anderson M E, Bromage L *et al* 1999 *Optics Express*, **5** 134

[10] Chai L *et al* 2002 *Chin. J. Lasers*, **A 29** 739(in Chinese) [柴路等 2002 *中国激光* **A 29** 739]

[11] Iaconis C, Walmsley I A 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 501

[12] Agrawal G P 1995 *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press Inc. 1995) p65

Optimization of the parameters for a SPIDER^{*}

Chai Lu¹⁾ He Tie-Ying²⁾ Yang Sheng-Jie¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾ Zhang Zhi-Gang¹⁾

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

²⁾ (School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 27 November 2002 ; revised manuscript received 7 March 2003)

Abstract

The correlations among three important parameters in SPIDER, the time delay τ between the test pulse replicas, the frequency shear Ω and the second-order dispersion $\ddot{\phi}$ determined from a stretcher, are investigated. The results show that there are different optimum time delays τ for different test pulses with a fixed $\ddot{\phi}$. The optimum time delays τ will increase as the duration of test pulse gets longer. However, the measurement may fail if the frequency shear Ω , which is direct proportional to the time delay τ , becomes too large to meet the condition of the sum-frequency. Therefore, for different widths of pulses, the magnitude of $\ddot{\phi}$ should be properly adjusted for selecting the optimum τ .

Keywords : SPIDER, characterization of femtosecond pulses, spectral shear

PACC : 4265R, 4260F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178007), the Natural Science Foundation of Tianjin (Grant No. 003800611), the National Defense Foundation of China (Grant No. 03JW1401), the National Key Basic Research Special Foundation (Grant No. G1999075201-2), the Foundation of Chinese Ministry of Education for the Key Teachers in Universities.