

频域标定飞秒脉冲干涉自相关迹及 钛宝石振荡器实时啁啾监测^{*}

谢旭东¹⁾²⁾ 王清月¹⁾ 柴 路^{1)†}

¹⁾ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

²⁾ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2004 年 11 月 15 日收到, 2005 年 2 月 2 日收到修改稿)

采用频域处理的方法首次在频域标定飞秒激光脉冲干涉自相关迹的时间扫描, 计算被测脉冲的均方根宽度和啁啾参数, 并以此为依据在实验中优化钛宝石振荡器的调节从而获得接近变换极限的 11.5 fs 脉冲. 该方法只涉及到数值积分和快速傅里叶变换, 在实验中完全可以用于实时监测振荡器的运行情况.

关键词: 频域标定, 钛宝石振荡器, 飞秒脉冲, 干涉自相关迹

PACC: 4260, 4265B, 4280W

1. 引 言

飞秒激光脉冲的测量与其产生一样极具挑战性^[1-3]. 因为没有更短的参考脉冲可以用来测量飞秒激光脉冲, 实验室里通常采用具有条纹分辨能力的干涉自相关法测量其宽度^[4,5]. 根据其干涉自相关迹(IAC)来判断激光器运行情况. 对 IAC 作频谱修正还可以实时监测待测脉冲的啁啾^[6]. IAC 条纹的周期与被测脉冲载波的周期相对应, 使其具有自标定特性. 根据其半高全宽(FWHM)内的条纹数推算被测脉冲的时间宽度是最简单的办法. 对同一脉冲特性的评价则依脉冲宽度的不同定义方法而不同. 用脉冲的 FWHM 参数评价其特性时, 只考虑了脉冲中部的宽度, 而不能考查脉冲基底对其质量的影响, 而均方根(RMS)宽度不受特定脉冲形状等因素的影响, 并可以评价脉冲两翼的能量分布. 较大的 RMS 宽度对应脉冲两翼较多的能量分布. 同时测量脉冲的 FWHM 和 RMS 宽度既表征脉冲中部的质量又考虑脉冲两翼的影响, 从而能更合理地评价脉冲质量. 用 RMS 宽度定义的脉冲啁啾参数表征了被测脉冲偏离变换极限的程度, 不必事先假设脉冲的形状、宽度以及中心波长. 计算 RMS 宽度需要准确知道 IAC

的时间扫描. 通常可以在相关器工作时, 利用 He-Ne 激光的干涉条纹来同步标定干涉自相关器的时间扫描^[7], 但是这样会导致相关器的结构复杂, 给使用带来不便. 我们提出频域处理的方法通过软件来标定 IAC 的时间扫描, 并将其用于指导振荡器的优化调节从而获得脉冲宽度 $\tau_{\text{FWHM}} = 11.5$ fs 的接近变换极限的飞秒激光脉冲. 该方法省去了时域的标定设备, 其数据处理只涉及到数值积分和快速傅里叶变换两个过程, 处理的速度很快, 可以用于实验室中指导振荡器的优化调节以及实时监测振荡器的运行.

2. 原 理

二次谐波发生(SHG)干涉自相关器的 IAC 可以用下列公式描述^[8]:

$$A(\tau) = 1 + 2A_0(\tau) + 2\text{Re}[A_1(\tau)\exp(-i\omega_0\tau)] + \text{Re}[A_2(\tau)\exp(-2i\omega_0\tau)], \quad (1)$$

式中 $A_0(\tau)$, $A_1(\tau)$, $A_2(\tau)$ 分别为零频率项、基频 ω_0 和二次谐波 $2\omega_0$ 的包络函数. 对于变换极限脉冲, 有 $A_0(\tau) = A_2(\tau)^{[9]}$.

$$A_0(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [I_1(t)I_2(t-\tau)]dt, \quad (2)$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60278003, 60178007), 国家重点基础研究发展规划(批准号: G1999075201-2, 2003CB314904)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311010)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: lull@tju.edu.cn

$$A_1(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [I_1(t) + I_2(t - \tau)] E_1(t) E_2^*(t - \tau) dt, \quad (3)$$

$$A_2(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [E_1^2(t) E_2^{*2}(t - \tau)] dt. \quad (4)$$

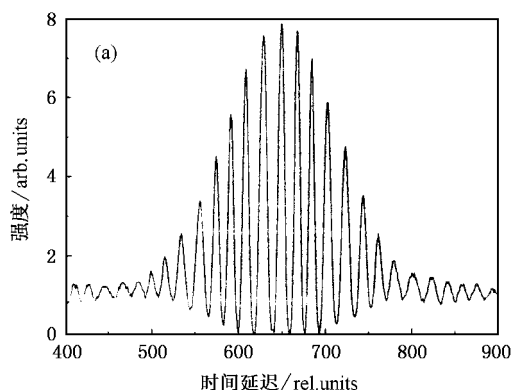
脉冲强度

$$I_{1,2} = |E_{1,2}(t)|^2.$$

归一化假设

$$\int_{-\infty}^{\infty} |E_{1,2}(t)|^2 dt = 1.$$

如果将未标定时间延迟的 $A(\tau)$ 对 τ 作傅里叶变换, 得到其傅里叶频谱 $A(\omega)$, 此时的频率轴只是



相对频率, 轴上各点的绝对频率无法得知, 将其称为伪频率(图 1(b)下部横轴). $A(\omega)$ 将包含三项分离的频谱成分, 直流分量在零频率处对应背景强度自相关 $1 + 2A_0(\tau)$, 基频分量 $A_1(\tau)$ 在 $\pm\omega_0$ 处, 二次谐波分量 $A_2(\tau)$ 在 $\pm 2\omega_0$ 处. ω_0 是被测脉冲载波的中心频率, 可以由独立测量的光谱得到(基频可以用加权中心频率表示, 图 1(b)内插图), 这样伪频域中各分量所在位置的频率就得以确定, 从而刻度了频率轴(图 1(b)上部横轴). 然后将 $A(\omega)$ 从频域变换回时域得到标定的 $A(\tau)$, 此时的延迟将具有时间的量纲(图 2 中的 IAC).

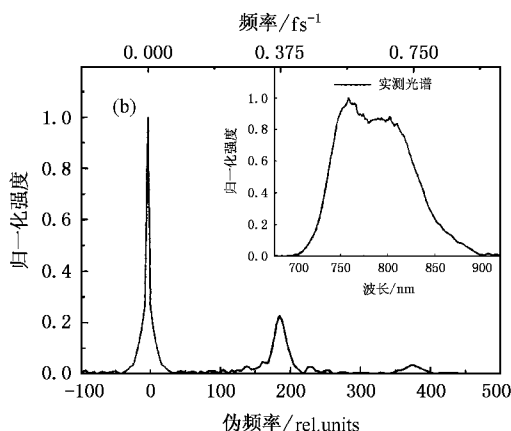


图 1 未标定时间扫描的实测 IAC (a) 及其傅里叶频谱 (b) 内插图为被测脉冲的功率谱

标定后的 IAC 可以用于计算脉冲 RMS 宽度

$\tau_{\text{RMS}} = 2\sigma$, 其定义如下^[10]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2N^2} \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 A_0(\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中

$$N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} A_0(\tau) d\tau.$$

根据实测脉冲以及变换极限脉冲的 RMS 宽度可以定义脉冲的啁啾参数 C ,

$$C = \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中 σ_0 是变换极限脉冲的 RMS 参数, 由独立测量的脉冲光谱变换获得.

根据强度自相关与干涉自相关的关系, 将 $A(\tau)$ 减去背景代入(5)式就可以计算 RMS 宽度, 因为高频的振荡部分(ω_0 和 $2\omega_0$)在积分的过程中已被平均掉. 对实测的 IAC 数据, 可以先将其变换到频域, 使用滤波技术提取直流分量, 然后反变换回到时域. 此时得到的是有背景强度自相关项(AC), 将其减

去直流背景就可以作为 $A_0(\tau)$ 代入(5)式求解被测飞秒脉冲的 RMS 宽度 τ_{RMS} .

3. 实验及分析

实验所用钛宝石振荡器采用典型的 X 腔型, 使用宽带啁啾镜与棱镜对相结合的办法补偿腔内色散. 腔外用棱镜对进一步补偿输出镜引入的材料色散、消除空间啁啾以及预补偿相关器内光学元件的色散. 我们利用自制的双光子吸收干涉自相关器测量钛宝石振荡器的输出脉冲.

调节振荡器内棱镜的插入量得到带宽为 105 nm 的双峰型光谱(图 2(a)曲线 a), 在此基础上调节腔外棱镜首先得到图 2(b)中所示的 IAC, 通过频域标定 IAC 的方法计算出脉冲的 RMS 宽度 $\tau_{\text{RMS}} = 20.9$ fs 和啁啾参数 $C = 1.015$. 说明此时脉冲的色散补偿还未达到最佳. 因此以啁啾参数为指导进一步调节色散补偿, 得到脉冲的 IAC 如图 2(c)所示, $\tau_{\text{RMS}} = 15.3$ fs, 而变换极限脉冲的 RMS 宽度 $\tau_{\text{RMS}0} = 14.7$

fs 啁啾参数 $C = 0.3$,说明色散补偿接近完善. 脉冲的 FWHM 宽度 $\tau_{FWHM} = 11.5$ fs 比 RMS 宽度 15.3 fs 略小 ,说明脉冲能量分布相对集中于脉冲的中部 ,两翼的能量分布较少 .

调节腔内棱镜插入量到最大允许时 ,得到非常

宽的光谱(图 2(a) 曲线 b). 此时 $\tau_{RMS} = 21.6$ fs , $\tau_{FWHM} = 10.2$ fs ,啁啾参数 $C = 0.98$,说明此时的色散补偿不够完善 . 比较图 2(c) 和 (d) 可以发现 ,虽然光谱展宽使得脉冲的 FWHM 有所压缩 ,但是脉冲的 RMS 宽度却有较大的增加 .

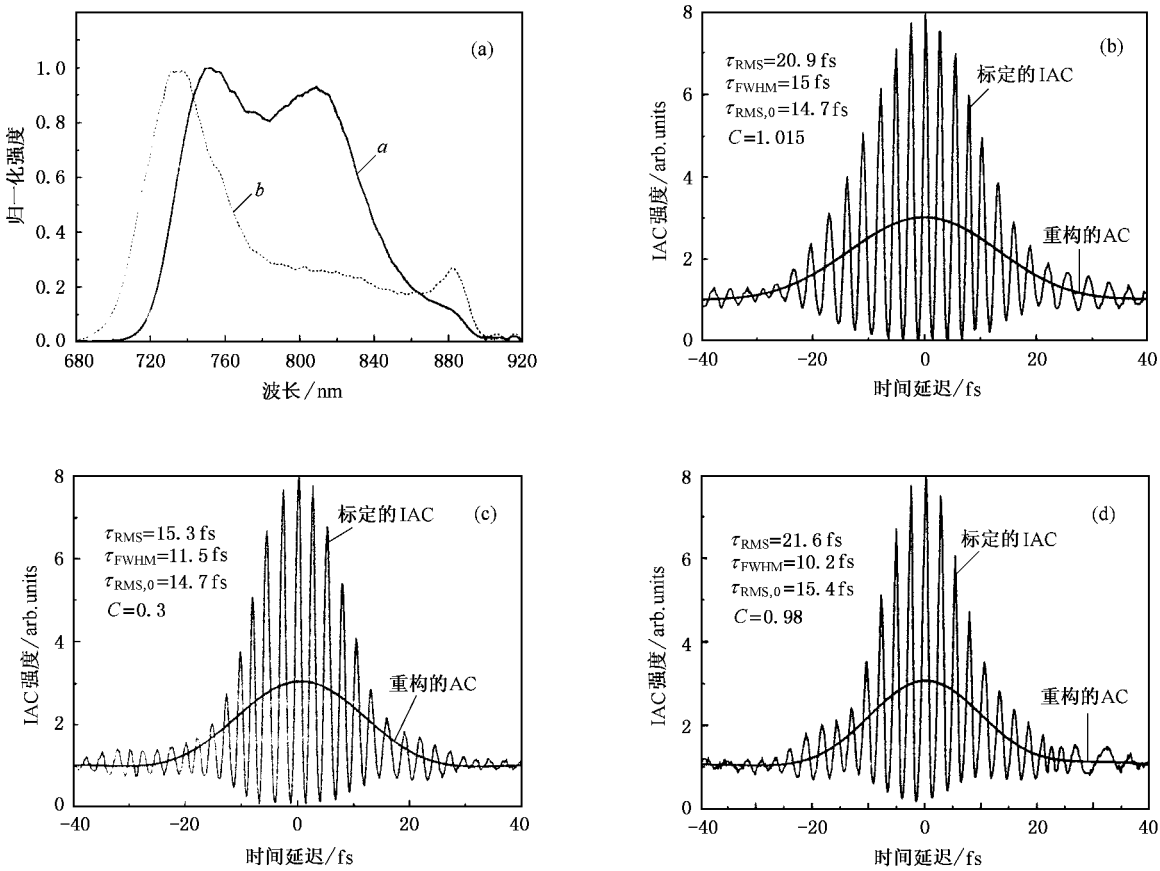


图 2 被测脉冲的功率谱及其标定的 IAC 和重构强度 AC (a) 被测脉冲的功率谱 (b) 标定的 IAC 及重构强度 AC ,色散补偿不完善时 IAC 啁啾参数较大 (c) 优化色散补偿后获得接近变换极限的脉冲 (d) 光谱进一步展宽及色散补偿不完善时脉冲中部被压缩两翼能量相对增加

4. 结 论

在脉冲宽度只有几个光学周期的飞秒激光的应用中 ,脉冲质量对应应用效果的影响是一个非常重要的因素 .如研究物质的相干控制、超快非线性光学现象等 ,此时不仅要关心脉冲中部的宽度 ,更要控制脉冲两翼的能量分布 .我们通过频域处理的方法标定

了 IAC 的时间扫描 ,并以此计算脉冲的 RMS 宽度和啁啾参数 .我们的实验获得了脉冲宽度 $\tau_{FWHM} = 11.5$ fs 接近变换极限的高质量飞秒激光脉冲 ,其能量相对集中于脉冲中部 ,具有尽可能小的两翼 .频域标定 IAC 的方法 ,数据的处理速度快 ,在实验中完全可以用于指导振荡器的优化调节以及实时监测其运行情况 .

- [1] Wang Z H , Wei Z Y , Teng H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 362
(in Chinese)[王兆华、魏志义、滕 浩等 2003 物理学报 **52** 362]
- [2] Deng L , Liao R , Liu Y X *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1938 (in Chinese)[邓 莉、廖 睿、刘叶新等 2003 物理学报 **52** 1938]
- [3] Chai L , He T Y , Gao F *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1487
- [4] Zhang W L , Chai L , Dai J M *et al* 1997 *Chin. J. Lasers* **24** 915
(in Chinese)[张伟力、柴 路、戴建明等 1997 中国激光 **24** 915]
- [5] Xing Q R , Sun T , Wang Q Y *et al* 2000 *Chin. J. Lasers* **27** 131
(in Chinese)[邢岐荣、孙 涛、王清月等 2000 中国激光 **27** 131]
- [6] Hirayama T , Sheik-Bahae M 2002 *Opt. Lett.* **27** 860
- [7] Baltuska A , Wei Z , Pshenichnikov M S *et al* 1997 *Appl. Phys. B* **65** 175
- [8] Nicholson J W , Rudolph W 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 330
- [9] Naganuma K , Mogi K , Yamada H *et al* 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-25** 1225
- [10] Sorokin E , Tempea G , Brabec T 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 146

Calibration of interferometric autocorrelation trace for femtosecond pulse in frequency domain and the real-time chirp diagnostic for Ti :sapphire oscillator^{*}

Xie Xu-Dong^{1,2)} Wang Qing-Yue¹⁾ Chai Lu¹⁾*

¹⁾ College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering , Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

²⁾ Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 15 November 2004 ; revised manuscript received 2 February 2005)

Abstract

The time delay of interferometric autocorrelation trace of femtosecond pulse was calibrated in frequency domain. By virtue of the calibrated interferometric autocorrelation trace , root-mean-square width and chirp parameter of the femtosecond pulse to be measured were calculated. Based on these parameters , the Ti :sapphire oscillator was optimized to generate 11.5 fs pulse in full width at half maximum , which was very close to the width of the transform-limited pulse. The measurement involved only an integration and a fast Fourier transform. Consequently , real-time chirp diagnostics for Ti :sapphire oscillator was feasible.

Keywords : calibration in frequency domain , Ti :sapphire oscillator , femtosecond pulse , interferometric autocorrelation trace

PACC : 4260 , 4265B , 4280W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60278003 , 60178007) , the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. G1999075201-2 , 2003CB314904) , and the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA311010) .

[†] Corresponding author. E-mail : ull@tju.edu.cn