

文章编号: 0258-7025(2004)08-1018-03

应用全反射二阶自相关仪测量超短脉冲脉宽

王兴涛, 印定军, 帅 斌, 李儒新*, 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学实验室, 上海 201800)

摘要 计算了普遍采用的二阶单发自相关仪光路中的分束片的色散引起的超短脉冲展宽量, 指出在脉冲极短时该展宽将导致不准确的测量结果(例如, 对于脉冲宽度为 3 fs 左右, 通过 100 μm 厚度的 K9 玻璃分束片, 脉冲展宽将达到 10%)。基于计算结果, 提出了一种新型的采用全反射结构的单发二阶自相关仪设计, 通过分波面的方法改变了自相关仪的分束方式, 避免了采用透射分束光学元件引起的色散。采用这种全反射式结构的二阶单发自相关仪, 可以使自相关测量方法测得的脉冲宽度更为准确, 计算得出理论上其最小时间分辨率可达 3.6 fs。

关键词 激光技术; 激光测量; 自相关; 全反射

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Measure Ultrashort Pulwidth with Total Reflection Second-Order Autocorrelator

WANG Xing-tao, YIN Ding-jun, SHUAI Bin, LI Ru-xin, XU Zhi-zhan

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

Abstract The expanding of the pulse duration due to the dispersion of the beam splitter adopted in normal single-shot second-order auto-correlator (SSA) was calculated. It is shown that, for ultra-short pulses, this kind of pulse-expanding will introduce imprecision of the result (e.g., for a pulse with the duration of about 3 fs, the expanding of a 100 μm thick beam-splitter of K9 glass is 10%). Based on these results, a kind of total-reflection single-shot auto-correlator is proposed. Via changing the beam splitting method from wave-front splitting to wave-surface splitting, the dispersion of the beam-splitter is avoided. By adopting this kind of SSA, the accuracy of the measurements for ultrashort pulses is improved. The calculated results show that the accuracy is about 3.6 fs.

Key words laser technique; laser measurement; autocorrelation; total reflection

1 引 言

在过去的十几年中, 啁啾脉冲放大(CPA)^[1]技术的提出与应用使超短激光脉冲的功率得到极大的提高。同时, 由于宽带激光晶体、克尔透镜锁膜技术和色散补偿技术的运用, 脉冲宽度也早已进入亚 10 fs 量级^[2, 3]。脉冲宽度的测量成为了解超短脉冲激光系统性能的不可缺少的手段。各种条纹相机是测量皮秒脉冲的可靠方法, 但对于飞秒脉冲, 条纹相机的分辨率显然不够, 于是利用倍频晶体进行二阶强

度或干涉相关测量成为主要的手段^[4, 5]。应用二阶相关原理, 已经实现了多种类型的测量装置, 而且由于啁啾脉冲放大激光系统输出的激光脉冲能量较高, 使得针对单个脉冲的宽度测量也成为可能。目前的二阶强度相关测量方法由于采用透射分束元件引起附加色散, 其测量精度受到限制。本文则报道了一种采用全反射结构的单发二阶自相关仪, 避免了采用透射分束光学元件引起的色散, 可以更为准确并直接地测量超短激光脉冲的时间宽度。

收稿日期: 2003-05-09; **收到修改稿日期:** 2003-10-09

作者简介: 王兴涛(1976—), 男, 湖北襄阳人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事超短超强激光技术的研究。

*通信联系人。E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

2 原理与误差分析

1987年, F. Salin 等^[4]提出了利用二阶强度相关法实施单个飞秒激光脉冲宽度测量的方法, 其基本思想是将脉冲的时域分布转变为空域分布。当两脉冲非共线进入倍频晶体后, 倍频光束沿两光束夹角的对称轴线出射, 其在垂直光束出射方向截面上的分布正比于入射脉冲的二阶相关函数, 于是对于确定形状的脉冲, 通过测量倍频光束的空间分布, 就可计算出入射脉冲的时间宽度。

对于一般的单发二阶相关仪, 文献[4]已指出其时间分辨率受限于如下因素: 非线性晶体中的群速度失配、相关仪中元件的色散效应、成像透镜的像差以及探测器像素的尺寸。

首先考虑透射分光器件带来的色散影响。在器件厚度一定时, 入射脉冲的时间宽度越小(相应光谱宽度越大), 其透过器件后脉宽展宽量越大。以 K9 玻璃为例, 其折射率公式可表示为

$$n_{\lambda}^2 = A_0 + A_1 \lambda^2 + A_2 \lambda^{-2} + A_3 \lambda^{-4} + A_4 \lambda^{-6} + A_5 \lambda^{-8} \quad (1)$$

其中各系数为^[6]:

$$A_0 = 2.27034, A_1 = -1.00793 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-2},$$

$$A_2 = 1.08804 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-2}, A_3 = 9.05396 \times 10^{-5} \mu\text{m}^4,$$

$$A_4 = 1.25496 \times 10^{-5} \mu\text{m}^6, A_5 = -7.32126 \times 10^{-7} \mu\text{m}^8$$

如果设入射初始脉冲为无啁啾的高斯脉冲: $E = E_1 \exp[-(t/\tau_1)^2]$, 则经过厚度为 L , 折射率为 $n(\omega)$ 的玻璃后, 根据文献[7] 出射脉冲为 $E = E_2 \exp[-(t/\tau_2)^2] \cdot (1 + ik_0)$, 其中

$$\tau_2 = \tau_1 \sqrt{1 + k_0^2} \quad (2)$$

$$k_0 = \frac{L}{c_1} \left| \frac{2}{c_0} \frac{dn}{d\omega} + \frac{\omega}{c_0} \frac{d^2n}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (3)$$

τ_1, τ_2 为入射和出射脉冲的时间宽度, c_0 为真空中光速。于是根据以上等式对于 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$, 也即 $\omega_0 = 2.356 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 可以得到脉冲的展宽比为

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \sqrt{1 + \left| \frac{L}{c_1} \times (4.4358 \times 10^{-26}) \right|^2} \quad (4)$$

由(4)式可以看到在玻璃厚度 L 一定时, 入射脉冲宽度越窄, 展宽量越大。若以脉冲展宽 10% 作为测量可靠的上限, 则对厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的 K9 玻璃, 计算脉冲通过后的展宽倍数表明, 当入射脉冲为 3.1 fs 时, 分束片的色散导致脉冲展宽了 10%, 对于更

短的脉冲, 即使不考虑其他的因素, 此处的误差也使得测量结果不可靠。

其次考虑非线性晶体对测量的影响。文献[8]分析了在干涉自相关测量技术中非线性晶体内存在的群速失配、基频光衰减以及输入脉冲形状对测量结果的影响。而在强度自相关测量技术中, 由于基频与倍频光束是非共线的, 并且最终探测器测量的是倍频信号的空间分布, 故不考虑群速失配带来的误差。在忽略基频光衰减的近似条件下, 只计算晶体色散对测量的影响。

以 BBO 晶体为例, 设其厚度为 L , 两基频光以 2θ 夹角入射, 由于 BBO 为负单轴晶体, 故其相位匹配方式为 ooe , 即入射基频光为 o 光, 而其对 o 光的折射率可表示为

$$n_o^2(\lambda) = 2.7359 + 0.01878/(\lambda^2 - 0.01822) - 0.01354\lambda^2 \quad (5)$$

同样根据(2), (3)式可得脉冲展宽比为

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \sqrt{1 + \left| \frac{L}{2\tau_1^2 \cos\theta} \times (-1.196 \times 10^{-25}) \right|^2} \quad (6)$$

若设 $L = 100 \mu\text{m}$, $\theta = 5^\circ$, 计算表明, 在入射脉冲宽度为 3.6 fs 时, 展宽量达到 10%。

最后对于成像透镜的像差以及探测器像素的尺寸带来的限制, 这可以通过选择合适放大倍率的低像差透镜来加以避免, 因此可以认为测量系统的时间分辨率不由这方面的因素决定。

由此可见, 分束片与非线性晶体都对测量结果带来误差, 但可采取相应的措施来提高测量系统的时间分辨能力。

3 全反射结构的设计

为了减小分束片带来的附加色散对待测脉冲脉宽的影响, 不再使用透射式的光分器件对激光束实施振幅分割, 而以两个小孔来对激光束实施波面分割, 从待测光束中直接取出两束光, 让其进入倍频晶体。具体结构如图 1 所示。

S_1 为两孔光阑, 两小孔直径为 5 mm , 中心相距 10 mm , 垂直于入射光束的传播方向, 且相对于光束中心成对称分布; F 为直角棱镜, 斜边与 S_1 平行; M_1, M_2 为反射镜; 倍频晶体为 BBO, 厚度 $100 \mu\text{m}$; S_2 为单孔光阑; 探测器为一维 CCD 相机。合理安排 M_1, M_2 , 使两束光入射到 BBO 晶体上; M_1, M_2 被放置在同一个调整架 D 上, 调整架的调整方向垂

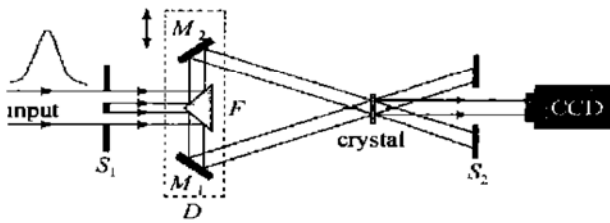


图1 全反射自相关仪的结构示意图

S_1, S_2 : 小孔光阑; M_1, M_2 : 全反射镜; F : 直角棱镜

Fig.1 Configuration of total reflection autocorrelator

S_1, S_2 : apertures; M_1, M_2 : total reflection mirrors;

F : right angle prism

直于光轴。

考虑到在前述相关仪的原理中, 一个关键的假定是认为在垂直光束传播方向的截面内, 光场各处的时间与空间结构是相同的。当光束的口径较大, 波面接近平面波时, 其衍射效应较小, 由于自由空间衍射而引起光束截面内各处时间结构的变化可以忽略。实际测量的光束是本实验室一台啁啾脉冲放大激光器最后输出激光脉冲的脉宽, 光束口径为 50 mm, 而其波面接近平面波, 强度分布接近高斯型的对称分布, 测量中使用的两个分光小孔直径为 5 mm, 中心相距 10 mm, 分光时两小孔相对光束成对称分布, 故可以认为所取两小光束的时间空间结构基本相同, 且在光束截面内时间结构的一维分布已用可进行一维空间分辨的相关仪测量过^[9], 测量结果证实了文中的假设。至于小孔本身引入的衍射效应, 考虑到待测光束的波长为 800 nm 左右, 而小孔直径为 5 mm, 远大于波长, 由小孔到非线性晶体的距离小于 1 m, 故衍射效应可以忽略。

在本装置中, 由于所有元件沿入射光束的光轴对称放置, 所以很容易使两束光达到等光程; 调节延迟时只要使 D 垂直于光轴作微小移动即可, 由于调节 D 时会引起两束光平移, 故在对系统进行定标时, 与一般的单发二阶相关仪不同, 若 D 移动的距离为 Δl_0 , CCD 上倍频光束峰值移动 Δx_0 , 入射脉冲的宽度 (FWHM) 为 η_0 , 倍频信号的宽度 (FWHM) 为 δ_0 , 则有下式

$$\eta_0 = \frac{1}{K} \cdot \delta_0 \cdot \frac{2n}{c} \cdot \left| \frac{\Delta l_0}{\Delta x_0 - \Delta l_0} \right| \quad (7)$$

为了避免介质膜引起的色散, 该自相关仪中的所有反射镜均为金属膜反射镜。

根据前面的分析, 在本装置中对入射脉冲有影响的只有倍频晶体, 为减小倍频晶体带来的误差, 其厚度应尽可能小。在本装置中 BBO 晶体的厚度为

100 μm , 故可得出本装置的时间分辨率为 3.6 fs。

4 实验结果

应用全反射自相关仪, 测量了本实验室一台啁啾脉冲放大激光器最后输出激光脉冲的脉宽, 测量结果如图 2 所示。在该自相关仪中, 两束光夹角为 10° , CCD 像素尺寸为 7 μm , 定标后可知被测脉宽为 45 fs。

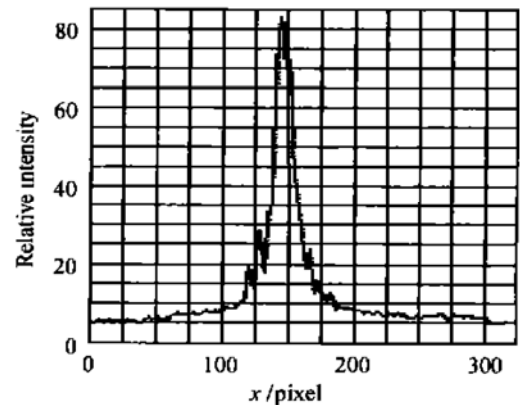


图2 测量结果

Fig.2 Measurement result

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulse [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219 ~ 221
- 2 S. Sartania, Z. Cheng, M. Lenzner *et al.*. Generation of 0.1-TW 5-fs optical pulses at a 1-kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1562 ~ 1564
- 3 I. D. Jung, F. X. Kärtner, N. Matuschek *et al.*. Self-starting 6.5-fs pulses from Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 1009 ~ 1011
- 4 F. Salin, P. Georges, Groger *et al.*. Single-shot measurement of a 52-fs pulse [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21): 4528 ~ 4531
- 5 Wang Yiming, Li Chuandong, Han Shengsheng *et al.*. Single-shot measurement of amplified femtosecond laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(2): 132 ~ 134
王益民, 李传东, 韩申生 等. 飞秒放大激光脉冲的单次测量 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(2): 132 ~ 134
- 6 Chinese Database of Optical Materials [S]. <http://fruits.sdb.ac.cn/chinaomd/K9>
中国光学材料数据库 [S]. <http://fruits.sdb.ac.cn/chinaomd/K9>
- 7 Jean-Claude M. Diels, Joel J. Fontaine, Ian C. McMichael *et al.*. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(9): 1270 ~ 1282
- 8 F. Hache, T. J. Driscoll, M. Cavallari *et al.*. Measurement of ultrashort pulse durations by interferometric autocorrelation: influence of various parameters [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(18): 3230 ~ 3236
- 9 Shuai Bin, Li Ruxin, Xu Zhizhan. Laser pulse measuring instrument that can simultaneously perform measurement and scaling [P]. Chinese Patent, Authorized number: ZL01274451.4
帅斌, 李儒新, 徐至展. 实用新型专利: 同时测量和定标的光脉冲信息测量仪 [P]. 中国专利, 授权号 ZL01274451.4