

文章编号: 0258-7025(2009)04-0945-04

短脉冲激光信噪比测量的标定方法

欧阳小平 张福领 唐顺兴 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为了实现脉冲信噪比(SNR)的高动态范围测量,确保测量结果的准确性,研究了信噪比测量标定方法。当光束入射到玻璃反射镜上时会在前后表面之间产生多次反射,这些反射光之间的强度依次递减,时间间隔是固定的。提出了信噪比测量系统的标定方法,计算了反射镜上的多次反射光的理论公式。实验结果表明,后表面上的相邻两次反射光之间的光程延迟都近似等于24 mm,而且相对强度的衰减量都在 10^{-2} 数量级。通过分析脉冲序列,可判断该信噪比测量系统的动态范围在 2.6×10^{-8} 左右。分析了材料吸收和群速度色散对信噪比测量系统的影响,确认这两个因素对信噪比测量的影响可以忽略。

关键词 超快光学;高功率激光;信噪比;标定

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0945

Calibration of Pulse Signal-to-Noise Ratio Measurement for Femtosecond Laser

Ouyang Xiaoping Zhang Fuling Tang Shunxing Zhu Jianqiang

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

Abstract In order to get a high dynamic range in pulse signal-to-noise ratio (SNR) measurement and ensure a high measurement accuracy, a research is taken on the calibration of pulse SNR measurement. As we know, a beam will generate multiple reflections with a fixed interval between every two neighboring reflections when it reaches a glass mirror. The light intensity will suffer the degression caused by these reflections. A calibration method for the pulse SNR is provided, and a formula for calculating the multiple reflections from glass mirror is established. Experimental results show that between two neighboring reflections from the back surface, the optical path delays are always close to 24 mm, and the attenuations of relative intensities are always about 10^{-2} . From the analysis on pulse sequence, the dynamic range of the pulse SNR measurement is obtained to be about 2.6×10^{-8} . Furthermore, the effects of material absorption and group velocity dispersion to pulse SNR measurement are also discussed, and it is found that these two factors are neglectable.

Key words ultrafast optics; high power laser; pulse signal-to-noise ratio; calibration

1 引言

在高功率激光物理中,需利用短脉冲的拍瓦激光进行快点火实验。拍瓦激光装置将振荡器输出的飞秒级啁啾脉冲展宽为纳秒级脉冲,然后经过光学参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)、主放大器进行放大,之后再通过光栅压缩器获得 10^{15} W的功率输出,从而在焦点处得到 $10^{19} \sim 10^{20}$ W/cm²以上的功率密度^[1~6]。物理实验对拍瓦激光装置的信噪比(SNR)

提出了 10^8 以上的苛刻要求。因此,为了配合拍瓦激光装置的研制,保证其运行的稳定性和可靠性,需要开展相应的精密诊断技术的研究。

采用自相关方法测量短脉冲激光的信噪比,是国内外普遍认可的一种有效方法。超短脉冲的信噪比测量中,已有的方法为三阶自相关原理下的单次测量和重复频率的扫描测量两种方法^[7~10]。单次测量方法能够通过单一脉冲获得激光的信噪比曲线,不过动

收稿日期:2008-04-07;收到修改稿日期:2008-07-08

基金项目:国家863计划资助项目。

作者简介:欧阳小平(1980—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事激光参数测试方面的研究。

E-mail:oyxp@siom.ac.cn

导师简介:朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光驱动器方面的研究。

E-mail:jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

态范围和时间窗口受到限制。重复频率下的多次扫描方法,能够获得 10^8 以上的动态范围以及 150 ps 以上的时间窗口。国内已有报道的信噪比测量系统为三阶自相关测量,动态范围在 10^6 左右^[11,12]。

本文建立了一套二阶自相关测量系统,通过研究二阶自相关过程,探索自相关测量的标定方法,为实现三阶自相关的高动态范围测量做好前期准备工作^[13]。

2 原 理

光强 $I(t)$ 的二阶自相关信号的数学表达式为

$$I_2(\tau) = \int I(t)I(t-\tau)dt, \quad (1)$$

它要求将被测超短脉冲分为两个信号,并用其中的一个信号扫描另一个信号,从而得到二阶自相关信号。二阶自相关过程通过非线性晶体实现。在此基础上,建立了一个自相关测量系统,并实现了二阶自相关信号的高动态范围测量。在短脉冲信噪比测量研究中,不仅需要自相关仪能够实现高动态范围的测量,而且需要验证自相关测量系统得到的数据符合激光器本身的状态,是输入信号的真实反映。

在前期实验中,发现来自于反射镜后表面的反射光出现在信噪比测量曲线上,表现为对称分布的次峰。其相对于主峰的位置,与反射镜的厚度有关。而且在 45° 入射情况下,来自于反射镜后表面的反射光由于逐渐偏移主光路,导致其产生的自相关信号幅度不断降低。为了得到理想的信噪比测量曲线,对光路进行了优化,用楔形反射镜代替平行平面反射镜,使测量值更接近于输入信号的真实值。

进一步的研究表明,来自于反射镜后表面的反射光,在一定情况下可以作为有用信号,标定自相关测量系统的动态范围。具体原理是,在分光后的其中一个光路引入一块 0° 反射镜,则反射镜后表面的反射光将会沿入射光路返向传输,这些后表面反射光在时间上出现的位置是等间隔的,其强度也是等比例减小的,形成了一个脉冲序列。当反射镜前后两个表面的反射率分别为 R_1, R_2 时,假设入射光束的强度为 1,从前表面直接反射的光强则为 R_1 。从后表面第一次反射回来的光强为 $(1-R_1)^2 R_2$,从后表面第二次、第三次、第四次反射回来的光强分别为 $(1-R_1)^2 R_1 R_2^2$, $(1-R_1)^2 R_1^2 R_2^3$, $(1-R_1)^2 R_1^3 R_2^4$ 。由于后表面反射而回到入射光路第一次、第二次、第三次和第四次反射光,强度之间形成一个等比数列,比值为 $R_1 R_2$,它们的时间间隔等于 $2nd/c$, n 为玻璃反射镜

的折射率, d 为玻璃反射镜的厚度, c 为光速。

假设分光反射镜的透射率为 a , 则其反射率为 $(1-a)$ 。分光之后,正常透射、传输的一部分光强,其时间特性保持不变

$$I_1(t) = aI_0 \exp(-4\ln 2t^2/\tau_{\text{FWHM}}^2), \quad (2)$$

式中 I_0 为入射的待测光强, $I_1(t)$ 为分光镜上透射光强, t 为时间, τ_{FWHM} 为待测光束的半峰全宽(FWHM), $\exp(-4\ln 2t^2/\tau_{\text{FWHM}}^2)$ 表示脉冲在时间上为高斯型分布。

在分光镜上反射,入射到 0° 反射镜的光强为

$$I'(t) = (1-a)I_0 \exp(-4\ln 2t^2/\tau_{\text{FWHM}}^2), \quad (3)$$

因此,从 0° 反射镜返回、然后透过分光镜的光强为

$$I_2(t) = a[R_1 I'(t) + (1-R_1)^2 R_2 I'(t-2nd/c) + (1-R_1)^2 R_1 R_2^2 I'(t-4nd/c) + (1-R_1)^2 R_1^2 R_2^3 I'(t-6nd/c) + \dots], \quad (4)$$

在二倍频晶体中, $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 之间实现互相关,将(2),(4)式代入(1)式可得到

$$I_X(\tau) = \int I_1(t)I_2(t-\tau)dt = \int aI_0 \exp(-4\ln 2t^2/\tau_{\text{FWHM}}^2) \times \{a[R_1 I'(t-\tau) + (1-R_1)^2 R_2 I'(t-\tau-2nd/c) + (1-R_1)^2 R_1 R_2^2 I'(t-\tau-4nd/c) + (1-R_1)^2 R_1^2 R_2^3 I'(t-\tau-6nd/c) + \dots]\} dt = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots, \quad (5)$$

式中 τ 为分光镜上的透射光($I_1(t)$) 和 0° 反射镜的前表面反射光(即 $I_2(t)$ 中的第一项) 到达二倍频晶体的时间延迟

$$X_1 = a^2(1-a)R_1 I_0^2 \sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}}{4} \times \exp\left(-\frac{2\ln 2\tau^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2}\right), \quad (6)$$

$$X_2 = a^2(1-a)(1-R_1)^2 R_2 I_0^2 \sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}}{4} \times \exp\left[-\frac{2\ln 2(\tau-2nd/c)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2}\right], \quad (7)$$

$$X_3 = a^2(1-a)(1-R_1)^2 R_1 R_2^2 I_0^2 \sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}}{4} \times \exp\left[-\frac{2\ln 2(\tau-4nd/c)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2}\right], \quad (8)$$

$$X_4 = a^2(1-a)(1-R_1)^2 R_1^2 R_2^3 I_0^2 \sqrt{\frac{\pi}{2\ln 2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}}{4} \times \exp\left[-\frac{2\ln 2(\tau-6nd/c)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2}\right], \quad (9)$$

⋮

可见,自相关测量的结果能够如实反映来自于 0° 反射镜后表面的多次反射光所存在的特定规律,从而可实现自相关测量系统的定标,确定测量系统的动态范围。其中,平行平面反射镜的前、后表面的反射率可以是未知的,并且可在实验数据中通过分析计算得到。

3 实验结果

用于标定的二阶自相关测量系统的实验光路如图1所示, M_0 为平行平面反射镜, $M_1, M_2, M_3, M_4,$

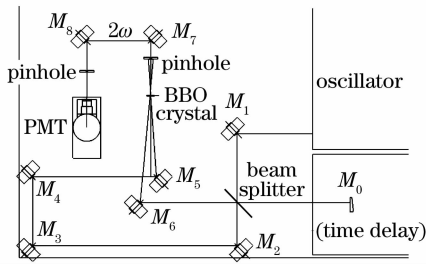


图1 信噪比测量及其标定示意图

Fig. 1 Schematic of SNR measurement and its calibration

M_5, M_6 为1053 nm的高反镜, M_7, M_8 为526.5 nm的高反镜,PMT为光电倍增管。短脉冲激光从振荡器输出后,经由反射镜 M_1 进入测量系统,分光镜上的反射光入射到 0° 反射镜 M_0 后产生脉冲序列,与直接透过分光镜的光发生自相关作用。通过改变时间延迟,得到信噪比测量曲线如图2所示。

通过对测量结果的分析,可综合出与信噪比测量标定有关的数据,如表1所示,步长为 $5 \mu\text{m}$ 。

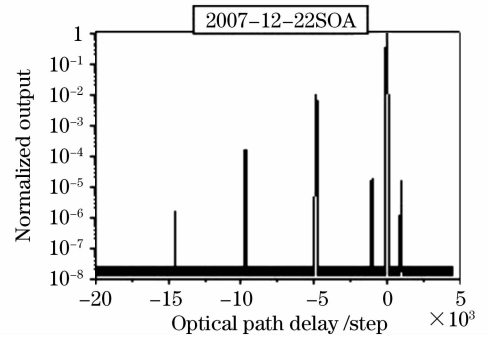


图2 标定实验中的信噪比测量曲线

Fig. 2 Curve of SNR in calibration experiment

表1 后表面反射光的实验数据

Table 1 Experimental data of back surface reflected light

0° incidence	Normalized intensity	Position of peak value /step	Optical path delay to front surface /mm	Calculated value of mirror's thickness /mm
Front surface	1	1	0	No
Back surface (1)	1.04×10^{-2}	-4853	24.27	8.09
Back surface (2)	1.66×10^{-4}	-9715	48.58	8.10
Back surface (3)	1.55×10^{-6}	-14569	72.85	8.09
Back surface (4)	$< 2.6 \times 10^{-8}$	Can't find		

表1中,后表面(1),(2),(3),(4)分别表示 0° 反射镜后表面的第一次反射光、第二次反射光、第三次反射光和第四次反射光。根据表1可计算得到 R_1, R_2, d 。根据测量数据得到的反射镜厚度计算值 d 与游标卡尺的测量值8.09 mm一致,证实了这几个次峰来自于平行平面反射镜。同时,反射镜的反射率计算得到, $R_1 = 0.555, R_2 = 0.03$ 。 R_1 的计算值与测量仪器的检定结果一致, R_2 计算值小于不镀膜表面的 0° 反射率0.04。

后表面第四次反射的相对强度,理论计算值为 $1.55 \times 10^{-6} \times 0.555 \times 3 \times 10^{-2} = 2.58 \times 10^{-8}$,刚好在探测器的探测范围之外,因此无法得到对应的测量值,同时也说明该信噪比测量系统的动态范围在 2.6×10^{-8} 左右。

造成不镀膜表面反射率的测量值小于理论值的因素,主要是反射镜体内的多次反射所附加的介质

吸收效应。光束在反射镜内传输过程中,需要考虑介质的吸收效应。光束通过透明介质时吸收损失的计算公式为

$$F_2 = F'_1 e^{-kl}, \quad (10)$$

式中 l 为透明介质厚度, F'_1 为入射到透明介质厚度的光通量, F_2 为通过透明介质厚度后的光通量, k 为光吸收系数。常用玻璃的光吸收系数类别为3,即 $k = 0.008$ 。在0.8 cm厚反射镜内双程传输中, $1 - F_2/F'_1 = 1 - e^{-kl} = 0.0127$,该数值接近1%,1.27%相对于1%的误差为27%。

另一方面,应考虑短脉冲在介质中的非线性效应。短脉冲的啁啾激光在介质中传输时,会因群速度色散(GVD)的原因而被展宽,降低脉冲功率,从而影响非线性转换的输出信号强度。经过介质传输之后的输出脉冲宽度 τ_{out} 与输入脉冲宽度 τ_{in} 之比为

$$\frac{\tau_{\text{out}}^2}{\tau_{\text{in}}^2} = 1 + 16 \frac{(\ln 2)^2}{\tau_{\text{in}}^4} \left(\frac{d^2 \phi}{d\omega^2} \right)^2, \quad (11)$$

式中 $d^2\phi/d\omega^2$ 为群速度色散。考虑到 K9 玻璃的群速度色散约为 $445 \text{ fs}^2/\text{cm}$, GLX-200 振荡器输出脉冲宽度为 230 fs , 可得到输出脉冲的半峰全宽函数曲线如图 3 所示。

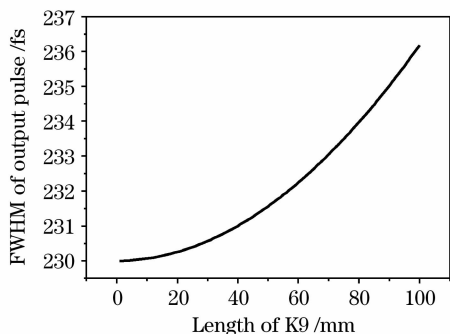


图 3 透过 K9 玻璃后的输出脉冲宽度

Fig. 3 FWHM of output pulse after transmitting K9 glass

由图 3 可见, 230 fs 的短脉冲展宽效应并不明显, 从而激光脉冲的功率不会出现明显变化, 因此不会对二阶自相关过程产生影响。

分析结果表明, 噪声信号 1% 左右的衰减主要由光吸收系数引起, 对应的不确定度为 27% 。考虑到信噪比测量系统的观测对象, 是以数量级为单位进行度量的, 因此标定方法中的系统误差在允许范围内。

4 结 论

结合二阶自相关仪开展了超短脉冲信噪比测量标定方法的初步研究。通过理论和实验分析可知, 使用 0° 反射镜的自相关光路中, 反射镜后表面的多次反射光会叠加成一个时间上的脉冲序列, 与前表面上产生的反射光同轴传输。在脉冲序列中, 相邻的前后两次脉冲之间的强度衰减存在固定的比值, 且两个相邻脉冲之间的时间间隔恒定。因此通过测量脉冲序列的强度和um时间特性, 可实现信噪比测量系统动态范围的分析。该标定方法的偏差来源于光学玻璃的吸收系数。通过此方法, 认为该二阶自相关仪的动态范围达到了 $\sim 10^8$ 。

信噪比测量系统的标定实验, 仍然是基于二阶自相关和三阶互相关的基本原理。因此虽然本实验是在 230 fs 的锁模振荡器上完成的, 但该方法对长脉冲, 比如皮秒或者更宽的情况下仍然适用。

致谢 感谢徐光、王韬、谢兴龙、季来林以及刘凤翹在实验中所给予的帮助和支持。

参 考 文 献

- 1 C. P. J. Barty, C. L. Gordon III, B. E. Lemoff, Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18):1442~1444
- 2 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*, Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):160~162
- 3 A. Antonetti, F. Blasco, J. P. Chambaret *et al.*, A laser system producing $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ at 10 Hz [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2):197~204
- 4 Kang Jun, Chen Shaohu, Zhu Jianqiang *et al.*, Highly stable second-harmonic pumping source with high conversion efficiency for optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):611~615
- 康俊, 陈绍和, 朱健强等. 高稳定高转换效率光参变放大器倍频抽运光源研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):611~615
- 5 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):161~165
- 马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):161~165
- 6 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Temporal property of tiled grating compressor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):701~705
- 马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅压缩器的时域特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):701~705
- 7 J. Collier, D. Hitchcock, C. Danson. Pulse contrast measurements of the VULCAN CPA front end oscillators [R]. *CLF Annual Report*, 1996
- 8 J. Collier, C. Hernandez-Gomez, R. Allot *et al.*, A single shot 3rd order auto-correlator for pulse contrast and pulse shape measurements [J]. *Laser and Particle Beams*, 2001, **19**(2):231~235
- 9 C. Hernandez-Gomez, E. Thurston, J. Collier. Scanning third order autocorrelator for contrast measurement in vulcan [R]. *CLF Annual Report*, 2001
- 10 F. Tavella, K. Schmid, N. Ishii. High-dynamic range pulse-contrast measurements of a broadband optical parametric chirp-pulse amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(6):753~756
- 11 Wang Yimin, Li Chuandong, Han Shensheng *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个测量[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(2):132~134
- 12 Wang Zhaohua, Wang Peng, Wei Zhiyi *et al.*, Contrast measurement of ultra-intensity laser pulses [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, **16**(4):434~436
- 王兆华, 王鹏, 魏志义等. 超短超强激光对比度的测量研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(4):434~436
- 13 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*, Second order autocorrelation applied on femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):742~745
- 欧阳小平, 张福领, 张攀政等. 短脉冲激光的二阶自相关研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3):742~745