

文章编号: 0258-7025(2009)00-0742-04

短脉冲激光的二阶自相关

欧阳小平 张福领 张攀政 谢兴龙 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为了实现短脉冲激光的高动态范围信噪比(SNR)测量,满足快点火对激光驱动器的要求,开展了信噪比测量的前期研究。结合非线性晶体分析了超短脉冲的二阶自相关信号的产生过程,结果表明自相关曲线的信噪比等于原始脉冲的信噪比。同时讨论了非共线二阶自相关中,两束输入信号光的夹角变化对输出信号光强的影响。在此基础上,建立了一台二阶自相关仪以验证超短脉冲信噪比测量系统的工作性能,其信噪比测量的动态范围达到了约 10^8 。

关键词 非线性光学; 飞秒激光; 信噪比; 二阶自相关

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0742

Second Order Autocorrelation Applied to Femtosecond Laser

Ouyang Xiaoping Zhang Fuling Zhang Panzheng

Xie Xinglong Zhu Jianqiang

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

Abstract The signal-to-noise-ratio (SNR) measurement is studied to achieve high dynamic range in pulse SNR measurement and meet the requirement of fast ignition of laser. The second order autocorrelation signal of short pulse occurring in nonlinear crystal is studied, which indicates that the pulse contrast of 2nd order autocorrelation equals that of original pulse. And the effect of the angle variation between two input beams on their output signal in non-collinear autocorrelation is discussed. A system of second order autocorrelation was built up to study the time characteristic of short laser pulse. Its dynamic range achieves $\sim 10^8$ in pulse contrast measurement.

Key words nonlinear optics; femtosecond laser; signal-to-noise-ratio; second order autocorrelation

1 引言

在高功率激光的物理实验中,需要开展相应的超短脉冲的精密诊断技术的研究。拍瓦激光装置将振荡器输出的飞秒级脉冲展宽为纳秒级脉冲,然后经过光学参量啁啾放大器(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^[1~9]。高信噪比(SNR)(大于 10^8)是快点火实验对拍瓦激光装置的一项要求。为了满足该要

求,研究高阶互相关下的高动态范围信噪比测量系统。

超短脉冲的信噪比测量,已有的方法为三阶互相关原理下的单次测量和重复频率的扫描测量两种方法^[10~14]。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。但国内有报道的信噪比测量为三阶互相关测量,动态范围在 10^6 左右^[14,15]。

收稿日期: 2008-02-18; **收到修改稿日期**: 2008-05-23

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。

Email: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

考虑到二阶自相关是三阶互相关的基础,以及国内在信噪比测量方面的局限,因此首先从二阶自相关原理着手,开展信噪比测量的理论和实验研究。二阶自相关方法是一个发展比较成熟,原理相对简单的测量方法,适合于振荡器输出的重复频率激光脉冲的测量。以往的二阶自相关原理下的实验,主要用于脉冲宽度测量^[16,17]。它的缺陷是,二阶自相关曲线是中心对称的,不能分辨出噪声在主峰之前还是之后。

2 方 法

光强 $I(t)$ 的二阶自相关信号的数学表达式为

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

(1)式要求将被测超短脉冲分为两个信号,并且两个信号之间存在可变的时间延迟 τ ,对不同时间延迟 τ 下的乘积 $I(t)I(t-\tau)$ 进行积分,从而得到二阶自相关信号。在实际应用中,二阶自相关过程通过非线性晶体实现。

首先考虑脉冲无噪声情况。在非线性晶体的和频过程中,两个不同频率的光电场 $E(\omega_1, z), E(\omega_2, z)$ 与介质相互作用时会产生极化电场 $E(\omega_3, z)$,假设它们的波矢为 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$,有如下耦合波方程成立^[18]

$$\frac{dE(\omega_1, z)}{dz} = \frac{i\omega_1^2}{\mathbf{k}_1 c^2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E(\omega_3, z) \cdot E^*(\omega_2, z) \exp(-i\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{dE(\omega_2, z)}{dz} = \frac{i\omega_2^2}{\mathbf{k}_2 c^2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E(\omega_3, z) \cdot E^*(\omega_1, z) \exp(-i\Delta k z), \quad (3)$$

$$\frac{dE(\omega_3, z)}{dz} = \frac{i\omega_3^2}{\mathbf{k}_3 c^2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E(\omega_1, z) \cdot E(\omega_2, z) \exp(-i\Delta k z), \quad (4)$$

考虑到 $I_\omega = cn|E_\omega|^2/2$ ^[19],可以得到小信号解为

$$I_{3\omega} = Kd_{\text{eff}}^2 L^2 I_{1\omega} I_{2\omega} \sin^2(\Delta k L/2), \quad (5)$$

上述公式中, $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$ 为晶体的有效非线性极化率, d_{eff} 为有效非线性光学系数, $\chi_{\text{eff}}^{(2)} = 2d_{\text{eff}}$ 。 L 为晶体长度, $K = 8\omega_3^2 / (c^2 n_1 n_2 n_3)$, $\Delta k = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = \Delta k(\theta, T, \lambda)$,是关于失配角 θ , 温度 T , 波长 λ 的函数^[20]。在二阶自相关过程中,分光之后的两束基频光强度会有所不同,但它们对强度进行归一化之后的波形是相同的,并存在时间延迟 τ ,因此有

$$I_{2\omega}(t) \propto I_{1\omega}(t)I_{1\omega}(t-\tau). \quad (6)$$

可见,输出光强正比于输入光强的乘积,当采用慢响应探测器时,得到积分信号

$$I_{2\omega}(\tau) = \int I_{2\omega}(t)dt \propto \int I_{1\omega}(t)I_{1\omega}(t-\tau)dt. \quad (7)$$

对比(1),(7)两式,可以认为小信号转换下的倍频过程的测量结果,等效于二阶自相关过程。

在信噪比测量中,需要监测的噪声,其强度相对于主峰的比值一般在 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 。在此条件下,倍频过程可以用参量上转换过程描述。假设带噪声的光强-时间函数为

$$I(t) = I_0 \exp(-4\ln 2 t^2 / \tau_{\text{FWHM}}^2) + I_{\text{noise}}(t+T), \quad (8)$$

这里假设噪声距离主峰的时间为 T ,线型未定。在参量转换过程中,仍然以(2),(3),(4)三式联立组成的方程组进行分析。假设第一束光为强抽运光, $dE(\omega_1, z)/dz = 0$,剩下(3),(4)两式, $E(\omega_2, z)$ 在此处为噪声 $I_{\text{noise}}(t)$ 的电场, $E(\omega_3, z)$ 为输出二倍频 $I_{2\omega}(t)$ 的光场,可以得到^[18]

$$E(\omega_3, z) = \frac{i\omega_3^2}{\mathbf{k}_3 c^2} \chi_{\text{eff}}^{(2)} E(\omega_1, 0)E(\omega_2, 0) \cdot \left[\frac{1}{L_M^2} + \left(\frac{\Delta k}{2}\right)^2 \right]^{-1/2} e^{-i\Delta k z/2} \sin \left\{ \left[\frac{1}{L_M^2} + \left(\frac{\Delta k}{2}\right)^2 \right]^{1/2} z \right\}, \quad (9)$$

BBO 晶体中,

$$L_M = \left[\frac{1}{2c^2} \left(\frac{\omega_2^2 \omega_3^2}{\mathbf{k}_2 \mathbf{k}_3} \right)^{1/2} \left| \chi_{\text{eff}}^{(2)} \right| \cdot E(\omega_1, 0) \right]^{-1} \approx 0.5 \text{ m}.$$

当倍频过程满足相位匹配条件时, $\Delta k \approx 0$,可以得到

$$I_{2\omega}(t) \propto I_0(t)I_{\text{noise}}(t) = I_{1\omega}(t=0)I_{1\omega}(t=-T), \quad (10)$$

因此,在信噪比曲线的主峰和噪声位置,都可以用非线性的二倍频转换过程实现数学上的二阶自相关过程。

用于脉冲信噪比测量场合时,首先假设带噪声的光强-时间函数为

$$I(t) = I_0 \exp(-4\ln 2 t^2 / \tau_{\text{FWHM}}^2) + I_{\text{noise}} \exp[-4\ln 2 (t+T)^2 / \tau_{\text{FWHM}}^2] \quad (11)$$

参考文献[21]的结论,对应的二阶自相关的解析解为

$$A(\tau) = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{4\ln 2}} I_0^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2/2\ln 2}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{4\ln 2}} I_0 I_{\text{noise}} \exp\left[-\frac{(\tau-T)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2/2\ln 2}\right] + \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{4\ln 2}} I_0 I_{\text{noise}} \exp\left[-\frac{(\tau+T)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2/2\ln 2}\right]. \quad (12)$$

噪声在二阶自相关曲线上呈对称分布。考虑到噪声出现位置 $\tau > 10 \text{ ps}$,振荡器输出脉冲宽度 τ_{FWHM}

$= 0.23 \text{ ps}$, 二阶自相关曲线只会在 $\tau=0, T, -T$ 处出现可探测的信号。因此二阶自相关曲线的信噪比为

$$\text{SNR} = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{4 \ln 2} I_0^2 \right) / \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{4 \ln 2} I_0 I_{\text{noise}} \right) = I_0 / I_{\text{noise}} = \text{SNR}(\text{origin}), \quad (13)$$

(13)式说明,二阶自相关曲线的信噪比,等于原始脉冲曲线的信噪比。

3 误差分析

超短脉冲在 BBO 晶体中,会因为群速度色散(GVD)的原因而展开,因此需要考虑其展宽量^[22]

$$\tau^2 / \tau_0^2 = 1 + 16(\ln 2)^2 / \tau_0^4 (d^2 \varphi / d\omega^2)^2 \quad (14)$$

式中 τ_0 为输入脉冲的宽度, τ 为输出脉冲的宽度, $(d^2 \varphi / d\omega^2)$ 为群速度色散, BBO 晶体的群速度色散约为 $800 \text{ fs}^2 / \text{cm}$ ^[23]。实验中用到的 BBO 晶体厚度为 2 mm , 当输入脉冲宽度为 230 fs 时, 计算得到输出脉冲宽度 $\tau = 230.01 \text{ fs}$ 。由于群速度色散引起的展宽量可以忽略, 不会产生时间波形导致的强度改变, 对信噪比测量没有影响。该结论也表明, 在信噪比测量实验中, 时间分辨率主要由光程延迟器的位移精度决定。电控平移台的位移精度为 $2.5 \mu\text{m}$, 对应的时间分辨率即为 16.7 fs 。

在非共线二阶自相关过程中, 输出信号的强度将会受到两束输入信号光的夹角 θ 的影响。通过前面的分析可知, 共线情况下, 输出光强正比于输入光强的乘积。在非共线情况下, 可以认为倍频晶体中发生作用的是电场分量在输出光强方向上的投影。二倍频过程中, 输出光强在两束输入信号光的角平分线上, 因此有

$$I_{3\omega}(t) \propto I_{1\omega}(t) I_{2\omega}(t) \cos^4(\theta/2). \quad (15)$$

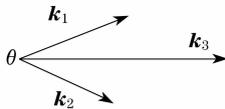


图 1 非共线条件下的和频 ($k_1 + k_2 = k_3$)

Fig. 1 Non-collinear sum frequency ($k_1 + k_2 = k_3$)

输出光强仍然正比于两束输入光强的乘积, 只是多了一个与角度 θ 有关的系数。如图 1 所示。

4 实验及数据

二阶自相关实验的基本光路如图 2 所示, M_0 为分光镜, $M_1 \sim M_4$ 为 1053 nm 的高反镜, PMT 为光

电倍增管, BBO 晶体厚度 2 mm 。振荡器输出的激光经过一块分光镜 M_0 之后, 光束被分成两路, 在分束镜 M_0 上发生反射的一部分光, 经由 M_3 反射, 进入 BBO 晶体。在分束镜 M_0 上发生透射的一部分光进入 M_1, M_2 组成的光程延迟器, 然后经由 M_4 反射, 进入 BBO 晶体。

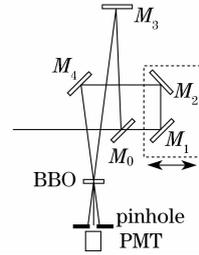


图 2 短脉冲的二阶自相关光路排布简图

Fig. 2 Scheme of 2nd order autocorrelation of short pulse

以往基于二阶自相关的信噪比测量主要是单次方式, 利用 CCD 进行数据采集。在图 2 所示的光路中, 测量了重复频率下的超短脉冲信噪比。所用的振荡器为 GLX-200-HP-1053, 输出功率 285 mW , 重复频率为 70 MHz , 脉冲宽度为 230 fs 。

在测量结果中, 二阶自相关呈现对称性分布, 主峰的两侧各有两个尖峰, 如图 3 所示。初步判断尖峰来源于振荡器本身。

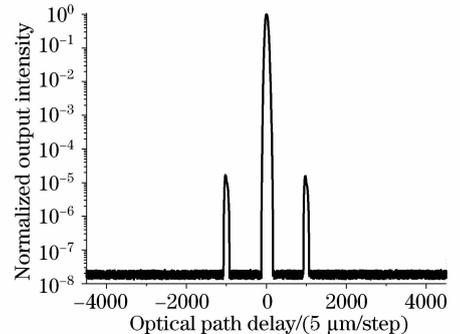


图 3 基于二阶自相关的信噪比测量曲线

Fig. 3 Pulse contrast curve measured under 2nd order autocorrelation

在信噪比测量实验中, 发现由于两束输入光束的夹角 θ 不同, 导致了输出光强与两束输入光强乘积的比值的变化。在 0.8° 情况下,

$$I_{3\omega}(t) : I_{1\omega}(t) I_{2\omega}(t) = 6.80 \times 10^{-2},$$

在 30° 情况下,

$$I_{3\omega}(t) : I_{1\omega}(t) I_{2\omega}(t) = 3.94 \times 10^{-2}.$$

上述二倍频光强为测量值, 基频光强通过分光镜、反射镜的反射率得到近似值。因此可以认为, 在角度增大的情况下, 倍频光强将会有所减弱, 这是因

为两束输入信号光在倍频方向上的分量减小,但其数值变化服从余弦函数的慢变特性,不会出现数量级上的改变。数据的较大变化,可能是因为夹角增大后,导致自相关作用的长度缩短造成的。

5 结 论

为了配合拍瓦激光装置的发展,满足超短脉冲时间特性分析的需要,建立了一台二阶自相关仪,在此二阶自相关仪上开展了超短脉冲信噪比测量的初步研究。分析了倍频过程中的角度变化对输出信号光强的影响,可以认为输入信号光夹角的变化在 30° 以内情况下,输出信号光强的变化对信噪比测量而言,都是可以接受的。实验中还发现,用于自相关的两束输入信号光强度可以不同,在小信号情况下,输出信号都正比于两束输入信号光强的乘积,分光镜的强度分配对实验结果没有影响。该测量系统目前可实现的动态范围达到了 $\sim 10^8$ 。

致谢 该实验是在高功率激光物理联合实验室的支持下开展的,在此感谢季来林、刘凤翘、葛露艳、浦亚弋在实验过程中的帮助。

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 5×10^{19} W/cm² 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 Liu Bo, Zhang Ruobing, Liu Huangang *et al.*. Investigation of spectral bandwidth of BBO-I phase matching noncollinear broadband optical parametric amplification from visible to near-infrared[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 21~28
刘博, 章若冰, 刘华刚等. BBO晶体I类相位匹配对可见光到近红外光宽带参量放大的带宽研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 21~28
- 8 Yang Xuedong, Xia Lan, Ma Weixin *et al.*. Experiment of

- real-time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1222~1226
杨学东, 夏兰, 马伟新等. 光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1222~1226
- 9 Wang Chuncan, Zhang Fan, Geng Rui *et al.*. Study on the improved high-power femtosecond pulse generation system[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 655~660
王春灿, 张帆, 耿蕊等. 改进的高功率飞秒脉冲系统理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 655~660
 - 10 J. Collier, D. Hitchcock, C. Danson. Pulse contrast measurements of the VULCAN CPA front end oscillators[R]. CLF Annual Report, 1996
 - 11 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
 - 12 C. Hernandez-Gomez, E. Thurston, J. Collier. Scanning third order autocorrelator for contrast measurement in vulcan [R]. CLF Annual Report, 2001
 - 13 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
 - 14 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
 - 15 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
 - 16 C. Kolmeder, W. Zinth, W. Kaiser. Second harmonic beam analysis, a sensitive technique to determine the duration of single ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1979, **30**(3): 453~457
 - 17 Zheng Hongjun, Liu Shanliang, Li Xin *et al.*. Autocorrelation characteristics of super-gaussian optical pulse [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 908~914
郑宏军, 刘山亮, 黎昕等. 超高斯光脉冲自相关特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 908~914
 - 18 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003
石顺祥, 陈国夫, 赵卫等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
 - 19 Liang Quanting. *Physic Optics*. [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998
 - 20 R. Stephen Craxton, Stephen D. Jacobs, Joseph E. Rizzo *et al.*. Basic properties of KPD related to the frequency conversion of 1 μm laser radiation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1782~1786
 - 21 Wang Yimin, Han Shensheng, Zhang Zhengquan *et al.*. Contrast ratio measurement of laser pulses using correlation technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4): 493~496
王益民, 韩申生, 张正泉等. 利用相关技术测量激光脉冲的对比度[J]. *光学学报*, 1997, **17**(4): 493~496
 - 22 Sterling Backus, Charles G. Durfee III, Margaret M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 1998, **69**(3): 1207~1223
 - 23 Yao Jianquan, Liu Hang, Ashok Puri. Femtosecond pulse—second and third harmonic generation with BBO [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(6): 641~647
姚建铨, 刘航, Ashok Puri. BBO晶体中飞秒脉冲的二次和三次谐波震荡产生[J]. *光学学报*, 1995, **15**(6): 641~647