

文章编号: 0258-7025(2009)05-1171-04

超短激光脉冲对比度的三阶相关测量

张福领 欧阳小平 谢兴龙 杨庆伟 郭爱林 孙美智 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 在超强超短激光脉冲与物质相互作用过程中,良好的激光脉冲对比度是一个非常重要的参数指标。为了扩大对超短激光脉冲对比度的测量范围,准确地测量超短激光脉冲的对比度,利用非线性晶体对激光脉冲强度变化十分敏感的特性,研究了超短激光脉冲三阶相关信号的产生过程,并在此基础上,研制了一台三阶相关仪,对一台飞秒激光振荡器进行了脉冲对比度的测量研究。测量结果表明,通过在测量光路中加入聚焦透镜进行聚焦准直,可以有效提高激光脉冲的倍频效率,从而大幅提高该三阶相关仪的可测动态范围。该测量系统目前可实现的可测动态范围达到约 10^8 。

关键词 非线性光学; 三阶相关; 脉冲对比度; 相关测量

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1171

Contrast Measurement of Ultrashort Laser Pulse with Third Order Correlation Technique

Zhang Fuling Ouyang Xiaoping Xie Xinglong Yang Qingwei

Guo Ailin Sun Meizhi Lin Zunqi

(National Laboratory for High Power Laser Physics Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract High laser pulse contrast ratio is one of the most important terms during the interaction of ultrashort laser pulse and substance. In order to enlarge the range of the pulse contrast measurement, a third-order correlator based on the technique of cross-correlation between the fundamental and second harmonic waves of ultrashort lasers is built. Using this correlator, the contrast ratio of ultrashort laser pulses from a typical Ti:sapphire oscillator is measured. The results show that the conversion efficiency of second harmonic and third harmonic of ultrashort laser pulse can be enhanced, and the dynamic range in pulse contrast measurement can be made much wider by using convex lenses, and the correlator's widest dynamic range in pulse contrast measurement is about 10^8 .

Key words nonlinear optics; third-order correlation; pulse contrast ratio; correlation measurement

1 引 言

由于啁啾脉冲放大(CPA)技术^[1]的出现,高功率、超短脉冲激光系统的研究近 10 年来取得了极大的进展。美国利弗莫尔实验室建立的 200 TW 全钛宝石(JanUSP)系统,聚焦光强达到了 10^{21} W/cm²^[2],最新报道的聚焦光强可达 10^{22} W/cm²^[3]。而在超强超短激光脉冲与物质相互作用过程中,脉冲对比度

是一个非常重要、并直接影响激光与物质相互作用效果的参数指标^[4,5]。因为激光的脉冲前沿会产生预等离子体^[6~8],它决定着等离子体的初始状态,并进而影响激光与物质相互作用的机制。所以,准确测量激光脉冲的对比度是一个很重要的问题。为了获得激光脉冲对比度的信息,目前普遍采用的测量方法是二阶相关法^[9]、三阶相关法等技术。虽然二

收稿日期: 2008-06-19; 收到修改稿日期: 2008-08-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804801)资助项目。

作者简介: 张福领(1978—),男,博士研究生,主要从事超强超短激光脉冲测量技术研究。E-mail: flzhang666@163.com

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变各单元技术的研究。

E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

阶相关法也能给出强度对比度的一些信息,但由于用这种方法获得的信号是前后对称的,因此它不能准确地提供脉冲前沿的参数;而三阶相关法中相互作用以产生相关信号的是两个波长不同的脉冲,故而可以比较准确地区分脉冲的前沿和后沿,从而准确给定噪声的位置,并能实现对比度较高的动态范围测量。本文在对三阶相关法分析探讨的基础上,研制了一台三阶相关仪,并对超短激光脉冲的对比度进行了测量研究,获得了 10^8 以上的动态范围,而国内有报道的激光脉冲对比度三阶相关测量的可测动态范围仅为 10^6 左右^[10,11],这为进一步测量放大后的激光脉冲的时域特性提供了基础。

2 原 理

三阶相关测量实际上是一种三次谐波的产生和时间测量过程,具体的方法通常是先将待测的入射激光脉冲经过一块非线性晶体进行倍频以产生二次谐波,然后将二次谐波与基波分开,并在两者之间引入一时间延迟后,再聚焦入射到一块和频晶体上,产生三次谐波,改变基频光与倍频光之间的相对延时,就可以测量记录到随时间变化的三阶相关信号。采用高斯脉冲近似,即假定激光主脉冲的时间形状和噪声脉冲的时间形状都为高斯型,则该脉冲的时间函数可表示为

$$I(t) = I_m \exp(-t^2/a) + I_n \exp[-(t+T)^2/b], \quad (1)$$

式中 I_m 和 I_n 分别表示主脉冲和噪声脉冲的峰值功率, a 和 b 与两个脉冲的时间宽度有关, T 为两个脉冲之间的时间间隔。(1)式表示在激光主脉冲的前面时间 T 处,存在有一个峰值功率为 I_n 的噪声脉冲,待测脉冲的信噪比为 $R_0 = I_m/I_n$ 。 $I(t)$ 的三阶相关函数可表示为^[12~14]

$$I_c(\tau) = \int I(t) I^2(t-\tau) dt, \quad (2)$$

式中 τ 为 $I^2(t)$ 与 $I(t)$ 之间的时间延迟。将(1)式代入(2)式,经过积分运算和化简,可得到 $I(t)$ 的三阶相关函数为

$$I_c(\tau) = \sqrt{\frac{\pi a}{3}} I_m^3 \exp\left(-\frac{2}{3a}\tau^2\right) + \sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m^2 I_n \exp\left[-\frac{2}{a+2b}(\tau+T)^2\right] \quad (3)$$

(3)式显示,在 $\tau=0$ 和 $\tau=-T$ 处分别有一激光脉冲,这与原激光脉冲的时间特征一致,反映出噪声脉冲的准确位置;也可以得出相应的激光脉冲的对比度为 $(2/3 + a/3b)^{1/2} R_0$ 。因此,通过三阶相关函数,可以比较准确地反映出原函数所代表的激光脉冲信噪比的大小以及前置噪声脉冲的准确位置。

3 实 验

实验中所用的振荡器为 GLX-200-HP-1053 nm,输出功率为 285 mW,重复频率为 70 MHz,脉冲宽度为 230 fs。先将 1053 nm 的飞秒激光聚焦入射到一块 2 mm 厚的 BBO 晶体中以产生 527 nm 的二次谐波,选用的 BBO 晶体为 I 类相位匹配^[15],匹配角为 22.9° 。倍频后的 527 nm 倍频光与基频光一起经另一透镜准直后,由一沃拉斯顿棱镜将两者在空间上分开,然后在 1053 nm 的光路上引入一时间延迟线,以使基频光和倍频光之间产生时间延迟 τ 。在此基础上,再将两束光共线聚焦入射到一块 2 mm 厚的和频 BBO 晶体上,该晶体为 II 类相位匹配,匹配角为 39.05° 。调节时间延迟及晶体的相位匹配方向,既可观察到 351 nm 的三次谐波输出。最后采用光电倍增管作为信号探测元件进行数据采集,就可以得到随时间变化并反映脉冲对比度的三阶相关曲线。图 1 为所采用的实验装置图。

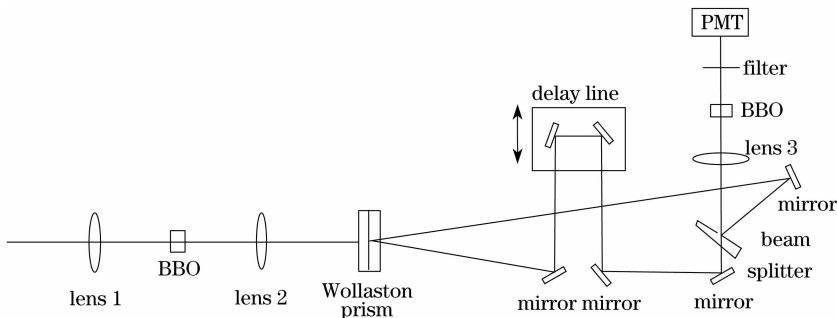


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of measurement system

在测量过程中,改变延迟时三次谐波的强度会发生变化,经历着一个由弱及强又到弱的过程。用

光电倍增管接收信号时,比较强的光会导致其饱和,因此用一组不同透过率的衰减片来改变入射到光电倍增管上的三次谐波的强度,当数据采集过程结束时,用实际测量到的信号强度乘上衰减倍率就可以得到真实的三阶相关信号。

4 实验结果及讨论

实验中利用该三阶相关测量装置测量了飞秒量

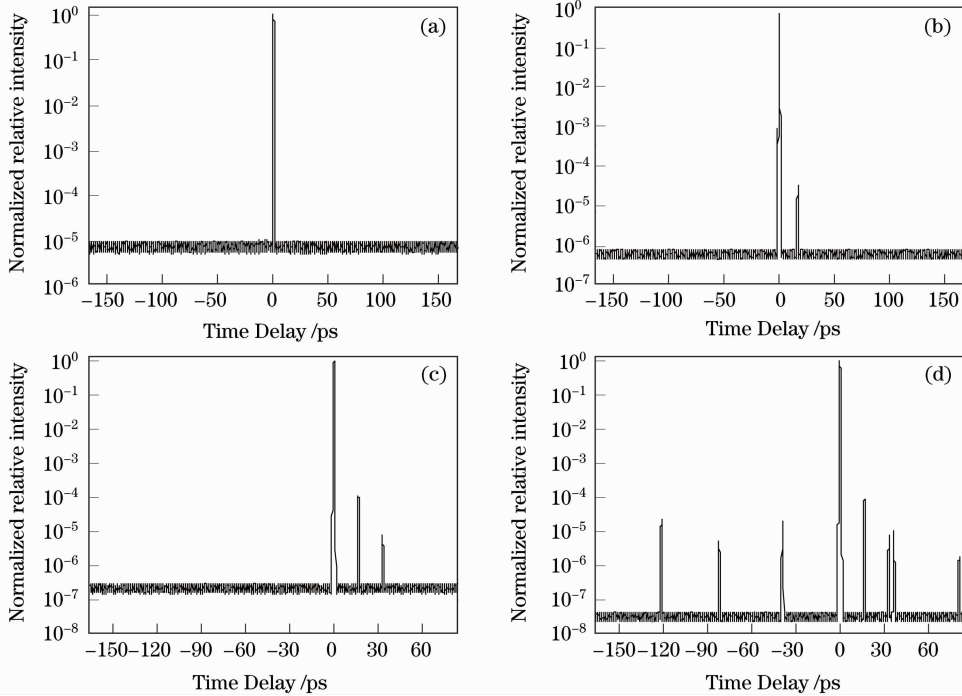


图2 三阶相关信噪比测量曲线。(a)光路中不加 L1,L2 和 L3;(b)仅加 L3;(c)仅加入 L1 和 L2;(d)加入 L1,L2 和 L3

Fig. 2 Third-order correlation curve. (a) none of L1,L2 and L3 in the measurement device;

(b) only L3;(c)only L1 and L2;(d) all these three lens

从图2可看出,通过在倍频晶体前加入聚焦透镜提高倍频效率,可以有效提升该测量系统可测的动态范围,且对分别在二倍频晶体和三倍频晶体前加入相同的聚焦透镜的情况,前者能够获得更大的动态范围(比较图2(b)和图2(c)),只是加入聚焦准直透镜后导致了尖峰信号的出现。在主脉冲之后16.7 ps左右位置,有一个恒定的尖峰信号,已经判断该尖峰来源于振荡器本身。其他的尖峰信号经计算分析可知,是在光路中加入聚焦准直透镜后,由于玻璃材料表面的二次反射形成的。如图中出现在主脉冲前约39 ps,82 ps和121 ps位置处的三个尖峰,分别对应石英透镜(厚8 mm)和胶合透镜(zf7和K9厚度分别为3 mm和8 mm)前后表面反射引起的时间延迟。因为这些尖峰信号的来源和位置已经确定,所以不会影响对脉冲对比度的测量诊断。

级内激光脉冲的时间强度分布情况。在测量过程中,通过在倍频晶体前加入聚焦透镜来提高倍频效率。图2(a)为光路中不加入聚焦准直透镜时测得的三阶相关曲线;图2(b)为仅在三倍频晶体前加入聚焦透镜 L3 时测得的三阶相关曲线;图2(c)为仅在二倍频晶体前后加入聚焦准直透镜 L1 和 L2 时测得的三次相关曲线;图2(d)为光路中同时加入 L1,L2 和 L3 时测得的三次相关曲线。

实验中也尝试将聚焦透镜稍微倾斜放置,发现对尖峰子脉冲的位置和大小几乎没有影响,这是由较小的光束口径和透镜前后表面较大的曲率半径导致的。该三阶自相关测量系统可测的动态范围能够达到 10^8 。

5 结 论

通过对三阶相关法的分析研究,建立了一台高动态范围的三阶相关仪,并利用它开展了超短激光脉冲对比度的测量研究。发现通过使用楔形板反射镜代替平行平面反射镜,可有效地消除由于反射镜后表面反射所引起的系统测量误差。另外,通过加入透镜进行聚焦准直,提高了倍频效率,使得该三阶相关测量系统的可测动态范围提高了两个量级,虽然透镜前后表面的二次反射会导致尖峰信号的出现

现,但由于这些尖峰信号的来源和位置已经确定,所以不会影响对脉冲对比度的测量诊断。该测量系统目前可实现的动态范围达到约 10^8 ,为进一步测量放大后的激光脉冲的时域特性提供了基础。由于三阶相关法能够给出强度对比度信息,因此在监测激光系统的细微状况、对系统优化提供判据、给强场物理实验提供参考等方面有重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. A. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 J. D. Bonlie, F. Patterson, D. Price *et al.*. Production of $>10^{21}$ W/cm² from large-aperture Ti:sapphire laser system[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(7): 155~160
- 3 S. W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon *et al.*. Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²) [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(24): 2837~2839
- 4 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274
郭爱林,杨庆伟,谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 5 Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong *et al.*. Influence of mirror curvature radius manufacture errors in offner stretcher on output pulse contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1584~1589
杨庆伟,郭爱林,谢兴龙等. Offner 展宽器曲面镜误差对输出脉冲对比度的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1584~1589
- 6 Y. T. Li, J. Zhang, Z. M. Sheng *et al.*. Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(16): 165002
- 7 G. Malka. Relativistic electron generation in interactions of a 30 TW laser pulse with a thin foil target[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**: 066402(1-8)
- 8 T. Hosokai. Effect of a laser prepulse on a narrow-cone ejection of MeV electrons from a gas jet irradiated by an ultrashort laser pulse[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**: 036407(1-8)
- 9 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 742~745
- 10 Wang Zhaohua, Wang Peng, Wei Zhiyi *et al.*. Contrast measurement of ultra-intensity laser pulses[J]. *High Power Laser and 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
- 11 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
- 12 D. C. Edelstein, E. S. Wachman, L. K. Cheng *et al.*. Femtosecond ultraviolet pulse generation in BBO [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(26): 2211~2213
- 13 M. Aoyama. Contrast and phase characterization of a high-peak-power 20-fs laser pulse[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**: S149~S152
- 14 A. P. Baronavski. Analysis of cross correlation, phase velocity mismatch, and group velocity mismatches in sum-frequency generation[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**: 580~589
- 15 Liu Bo, Zhang Ruobing, Liu Huagang *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 类相位匹配从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