

高强度激光脉冲信噪比的单次测量技术

马金贵¹ 王永志¹ 袁鹏^{2*} 王静² 朱鹤元¹ 钱列加¹

(¹ 复旦大学光科学与工程系, 上海 200433; ² 上海交通大学物理系激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要 脉冲信噪比是高强度激光的一个重要技术参数,反映了激光系统的技术水平。由于高强度激光的重复频率很低甚至单次运行,必须开发实时的单次测量技术。当前,信噪比单次测量技术非常匮乏,技术难度远高于扫描测量方式。本课题组提出了可实现大窗口、高动态范围测量的技术方案,形成了系列创新技术,通过关键技术集成研制了实用化的测量样机。原理性验证实验考核了技术方案的可行性、可靠性和主要技术性能,已实现动态范围约为 10^9 、时间窗口50~100 ps和分辨率0.5~1 ps的信噪比单次测量,且在时间窗口内无测量引入的假信号。脉冲信噪比单次测量样机已成功应用于我国的拍瓦激光装置。

关键词 测量; 单次测量; 脉冲信噪比; 准相位匹配; 长波长取样; 光纤阵列

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080008

Single-Shot Pulse-Contrast Measurement for High-Intensity Lasers

Ma Jingui¹ Wang Yongzhi¹ Yuan Peng² Wang Jing² Zhu Heyuan¹ Qian Liejia¹

¹ Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433
² Key Laboratory for Laser Plasma (Ministry of Education), Physics Department,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

Abstract Pulse contrast is an important specification of high-intensity laser, reflecting the technical level of the laser system. As such lasers generally operate in a very low repetition rate and even in a single-shot mode, real-time single-shot measuring techniques are necessary for diagnosing pulse contrast. Compared with time-scanning measurement, the techniques for single-shot measurement are very deficient and more difficult. We present a new measuring scheme supporting high dynamic range and large temporal window simultaneously. Integrating the series of innovative technologies, we make a practical measuring prototype whose feasibility and reliability as well as the main performance have been examined by the proof-of-principle experiments. The pulse contrast can now be measured with high resolution and high fidelity at a dynamic range of about 10^9 within a temporal window of 50~100 ps. The invented measuring prototype has been applied successfully in the national petawatt laser system.

Key words measurement; single-shot measurement; pulse contrast; quasi-phase-matching; long-wavelength sampling; fiber-array

OCIS codes 120.4640, 190.4360, 230.4320

1 引言

随着啁啾脉冲放大(CPA)技术的发展,目前高能激光脉冲的聚焦光强可达 10^{20} W/cm²或更高。如此高的光强使人们可以在实验室环境下研究天体物理、相对论等离子体物理、粒子加速新机制等前沿课题,所有这些实验应用均对驱动激光的脉冲前沿信噪比提出了严格的要求^[1]。所谓脉冲信噪比是指激光主脉冲的峰值强度与其前沿脉冲或噪声本底强度的比值。预等离子体的产生阈值在 10^{11} W/cm²的光强水平,如果前沿

收稿日期: 2013-06-17; **收到修改稿日期**: 2013-06-21; **网络出版日期**: 2013-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61008017)、复旦大学重点学科优秀博士生科研资助计划

作者简介: 马金贵(1986—),男,博士研究生,主要从事高功率激光信噪比单次测量方面的研究。

E-mail: 09110720002@fudan.edu.cn

导师简介: 钱列加(1965—),男,教授,主要从事超快非线性光学和大型激光工程技术方面的研究。

E-mail: ljqian@fudan.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: pengyuan@sjtu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

脉冲或噪声本底的强度超过这个阈值,就会在主脉冲到达靶之前将靶电离,改变靶的性质。因此必须严格控制前沿脉冲或噪声本底的强度低于预等离子体产生阈值,这要求前沿信噪比要高于 10^9 (对 10^{20} W/cm² 的聚集光强而言)。要达到如此高的前沿信噪比,既要找到激光放大系统中影响信噪比的物理因素并加以抑制^[2-5],还需要发展高效的信噪比提升技术^[6-10]。信噪比的测量也是一个不可或缺的重要环节,它是一切研究和使用的前提。高重复率(大于等于 10 Hz)激光脉冲的信噪比可以通过扫描方式测量^[11-12],现在已有商品化的仪器,如法国 Amplitude 公司的扫描型互相关仪(Sequoia)。而对于低重复频率甚至没有重复频率(单次)的超短、超强脉冲的信噪比测量,扫描方式不再适用,必须发展相应的单次测量技术。它要求只根据一个激光脉冲,就可以测出在一定时间窗口内的脉冲前沿信噪比信息。

单次测量脉冲信噪比是个世界性难题,通常采用的方法是基于时间-空间编码的非共线互相关仪,即宽光束的待测脉冲和干净(信噪比要高于待测脉冲一个数量级以上)的取样脉冲以一定的非共线角入射晶体并发生非线性频率转换[和频(SFG)或差频(DFG)],非共线作用使产生的互相关信号光束的不同空间位置代表待测脉冲不同时间位置的信噪比信息,然后使用线阵或面阵探测器接收相关信号^[13-17]。单次互相关信噪比测量仪包含三个主要单元,即取样脉冲产生^[18]、互相关器^[19]和探测器^[20],它们决定了脉冲信噪比单次测量的四个主要技术指标:动态范围、时间窗口、分辨率和保真度。动态范围主要由相关过程的转换效率和探测器的灵敏度决定;时间窗口由相关过程所允许的非共线角大小决定,而非共线角的大小主要由相关晶体的相位匹配条件决定;分辨率则由待测脉冲和取样脉冲之间的群速度失配决定,薄晶体有利于分辨率的提高;最后,保真度主要是指测量过程不会引入额外的前沿脉冲(假信号),这些假信号一般是在相关晶体的前后表面反射形成的,厚晶体可以使假信号出现的时间位置远离主峰,到时间窗口之外^[21]。这样分辨率和保真度就构成了一对矛盾,高分辨率需要薄晶体而高保真度需要厚晶体,在常规晶体中这对矛盾是无法克服的。

目前以上四个技术指标可以分别独立地进行优化,但要同时实现高动态范围、大时间窗口、高分辨率和高保真度则非常困难。比如利用色散元件引入脉冲等时间面倾斜虽然可以增大单次时间窗口(100 ps/cm),但将严重牺牲分辨率(大于 5 ps)^[15-16]。针对以上困难,本课题组先后提出了相应的技术予以克服,经过多年的技术创新和经验积累,目前已经掌握了一套各项指标均非常好的实际可行的技术路线。本文对此予以详细的阐述。

2 脉冲信噪比单次测量新技术

为解决脉冲信噪比单次测量难题,首先需要充分了解和析单次测量的主要难点,要跳出框框、大胆设想,不能受已有测量方案的约束。在解决具体问题的时,特别需要通盘考虑,同时兼顾各项指标要求,而不是顾此失彼。在这种思路的指导下,我们提出将准相位匹配(QPM)技术引入到信噪比测量的互相关过程,该措施可以突破原有的技术障碍,实现高性能的单次测量。

2.1 基于准相位匹配的互相关过程

单次测量的时间窗口主要取决于待测光束和取样光束间的非共线角的大小,在常规晶体中,非共线角受到双折射相位匹配条件的限制,不能很大(往往小于 10°),从而使单次测量的时间窗口受限。为了突破这一限制,我们将 QPM 晶体引入到信噪比单次测量中来^[18-19,21]。采用周期性极化的晶体作为相关晶体,它比传统晶体多了极化周期这一自由度,从而可以突破双折射相位匹配条件的限制,允许超大角度($40^\circ \sim 90^\circ$)的非共线相互作用,实现大的测量窗口。如图 1 所示,周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体比体材料的铌酸锂(LiNbO₃)所允许的非共线角大很多,从而允许更大的单次时间窗口。准相位匹

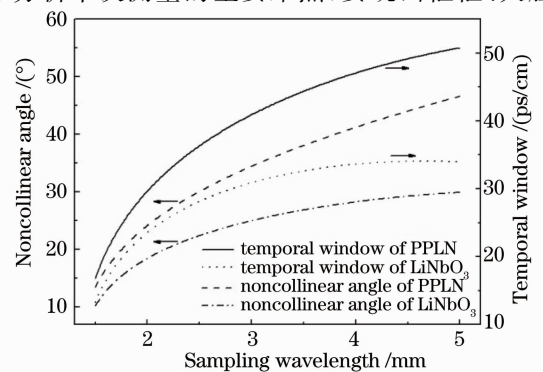


图 1 计算的 LiNbO₃ 和 PPLN 中最大允许的非共线角和时间窗口随取样波长的变化关系。待测脉冲的波长固定为 800 nm,相关过程为和频形式

Fig. 1 Calculated maximum noncollinear phase-matching angle of SFG and temporal window with a dependence of sampling wavelength in LiNbO₃ and PPLN crystals, respectively. The wavelength of the measured pulse is 800 nm

配还有一个独特优点就是有效非线性系数大,同样的输入能量可以实现更高的转换效率,从而大幅提高测量的动态范围。

2.2 长波长取样脉冲

信噪比测量需要一个“干净”光脉冲对待测光进行取样,这就需要有一个信噪比提升过程。倍频(SHG)是获得取样光脉冲的最常用手段,虽然非常简单,但却限制了最大允许的非共线角。我们研究发现,可以把波长作为一个设计的自由度,通过选择取样波长可以将单次测量的时间窗口最大化^[18]。如图1所示,取样脉冲的波长越长,所允许的最大非共线角越大,相应地单次测量的时间窗口也就越大。例如当取样脉冲波长位于 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 时,对于PPLN晶体最大的非共线角将达到 40° 左右,不用其他的技术(比如脉冲倾斜)就可实现约 $45\ \text{ps/cm}$ 的时间窗口。长波长取样光可以通过光参量放大(OPA)来产生。理论研究表明由待测脉冲抽运的OPA产生的中红外闲频光的信噪比远高于待测脉冲^[10],可以作为取样光脉冲。长波取样还有一个好处就是可以使相关信号位于可见光波段,方便后续光路的搭建和调整,避免使用紫外光学器件。

2.3 “极化+白片”形式的晶体特殊设计

由于晶体表面间多次来回反射,相关过程不可避免地会引入假信号^[21]。第一类假信号是“时间上反射”引入的,即取样光的内反射光与待测光主峰作用,在前沿产生假信号,如图2(a)所示。另一类是空间上的假信号,即产生的相关信号主峰在晶体前后表面反射,在前沿引入假信号,如图2(b)所示。晶体表面镀膜或加工倾角可以降低反射引入的假信号的大小,但在 10^{-9} 水平上很难将反射的影响完全消除。为了解决这个问题,可以使用厚晶体,使前后表面反射引入的时间上的假信号远离主峰,移到时间窗口之外。但是厚晶体会降低测量的时间分辨率,引发新的问题。对此,周期性极化的晶体显示出了它的优越性,灵活的结构设计使以上问题迎刃而解。如图2(c),(d)所示,在一块长为 L 的 LiNbO_3 基片上仅极化长为 L_1 的一小部分。相关过程仅发生在极化区内,分辨率仅由极化区的长度 L_1 决定,而信号反射看到的是整个基片(极化+白片)的长度 L 。这样根据分辨率和保真度的要求,可以设计 L 和 L_1 的值,既保证分辨率又避免假信号(移到窗口之外),如图2(c)所示。同时,空间上的假信号可通过改变两束光的入射角度使假信号反向后沿[图2(d)]。

2.4 基于光纤阵列的高灵敏度并行探测系统

由于时-空编码,沿横向空间分布的脉冲互相关信号需要并行探测的系统进行测量记录。一般采用CCD作为探测器,但是CCD的灵敏度太低,而且电噪声很高,限制了系统的动态范围(仅数十倍)。为了使信号强度处于探测器的动态范围之内,必须对强的互相关信号进行衰减,这就需要加工复杂且不具有可重复使用性的空间可变衰减器,而且边缘散射将影响测量的准确性。光电倍增管(PMT)的探测灵敏度高,但它是单点式探测器,无法进行多数据同时并行测量。针对这个问题,我们研发了一套基于光纤阵列和光电倍增管的高灵敏度的并行探测系统^[20],如图3所示。光纤阵列FA由120根不同长

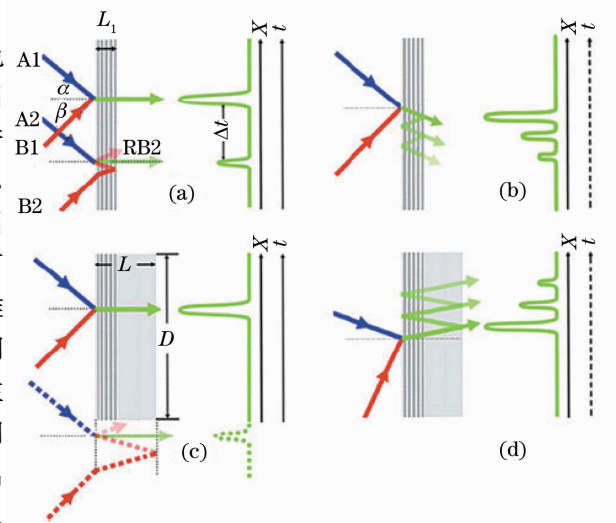


图2 相关过程引入的两类假信号的产生机制和相应的晶体设计。负的时间延对应脉冲的前沿。蓝线、红线和绿线分别表示待测脉冲、取样脉冲和相关和频脉冲

Fig. 2 Schematic diagram showing the formation of the correlation-related artifacts and the PPLN crystal design. Negative delays correspond to the pulse leading edge. The blue, red and green arrows represent the rays of the measured, sampling and correlating pulses, respectively

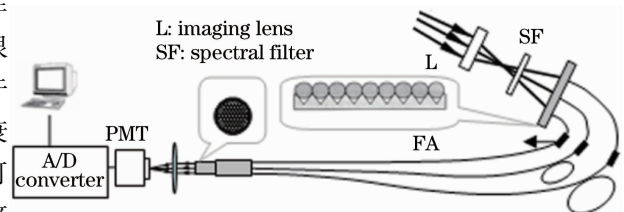


图3 基于光纤阵列和光电倍增管的高灵敏度并行探测系统光谱滤波片

Fig. 3 Schematic of the high-sensitivity parallel detection system based on fiber array and PMT

度的光纤组成,它们的一端按长度顺序排成一排,另一端做成光纤集束。相邻光纤长度的间隔必须保证脉冲传输的时间差大于 PMT 的响应时间。按时间前后次序分布的空间上的互相关信号同时进入 FA,经过不同光纤的传输,从光纤集束出射后变成时间上串行的信号,被 PMT 接收,然后经过模数(A/D)转换,输入电脑进行数据处理。此探测系统灵敏度高,而且每根光纤上可以方便地增减光纤衰减器,使信噪比的高动态范围(大于等于 10^9)成为可能。

3 新技术拓展

3.1 高阶 QPM 互相关

前文提到,利用准相位匹配可以增大单次测量的时间窗口。研究表明极化周期也可以作为一个设计的自由度,如图 4 所示,在一定的取样波长下,极化周期越小可以支持的时间窗口就越大^[19]。因为周期越小,相位补偿能力越强。但是由于受加工工艺的影响,极化周期不能很小,一般在 $4 \mu\text{m}$ 左右。为了使窗口进一步增大,提出了高阶 QPM 互相关的概念,其光栅格矢的模为 $k_\Lambda = 2\pi m/\Lambda$,阶数 m 为奇数, Λ 为极化周期。三阶 QPM ($m=3$)要比常见的一阶 QPM 的相位失配补偿能力大三倍,从而可以在相同的极化周期下,支持更大的单次测量窗口。例如,基于三阶 QPM,采用图 4 插图中的互相关构型,在 $\Lambda=4.9 \mu\text{m}$ 时,支持的单次测量窗口能力可达 70 ps/cm 。如果晶体的宽度为 2 cm ,则单次测量的时间窗口为 140 ps 。

常见的高功率激光主要对应两个波段,即 800 nm 波长的钛宝石激光和 1054 nm 波长的钕玻璃激光,高阶 QPM 支持两类激光的信噪比测量。针对这两种波长的高强度激光,分别设计了三类互相关构型:第一类是基于三阶 QPM 匹配的互相关测量 1054 nm 激光[图 5(a)],第二类是差频构型测量 800 nm 激光[图 5(b)],第三类是长波长取样的和频 SFG 构型测量 800 nm 激光[图 5(c)]。前两类构型均采用五阶 QPM ($m=5$),取样光均为各自待测光的 SHG;第三类构型采用三阶 QPM ($m=3$),取样光为 OPA 产生的 $3.4 \mu\text{m}$ 光。这三类构型详细参数和技术指标见表 1。

3.2 粗-细光束作用

前面所述的信噪比测量均是基于粗-粗光束的相关测量。这里指出的是,得益于高阶 QPM 强大的相位失配补偿能力,待测光束和取样光束间的夹角可以增大到 90° ,即两束光可以分别从晶体的相邻两个侧面入射,此时取样光可以采用细光束^[19]。这种“粗-细光束”作用的构型有很多优点:1) 90° 非共线角使单次测量窗口可以很大;2) 由于细的取样光是在比较宽的横向维度来回反射,假信号的时间位置可以移到前沿 100 ps 之外,窗口内天然没有反射引入的假信号;3) 分辨率高而且可调,分辨率由细光束口径决定,设计细光束口径大小可以调整测量的分辨率。针对 800 nm 激光的测量设计了一款“粗-细光束构型”,如图 5(c)所示,参数指标见表 1。

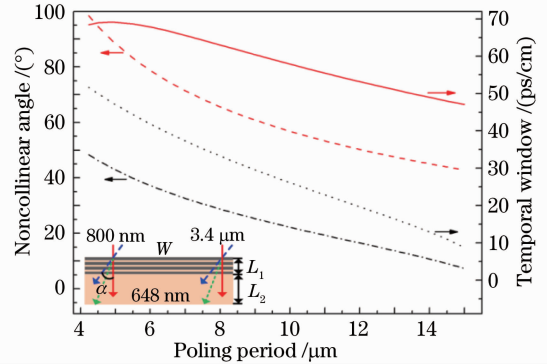


图 4 计算的非共线角和时间窗口随 PPLN 极化周期的变化关系。红色虚线代表三阶 QPM,黑色虚线代表一阶 QPM。插图中是计算采用的相关构型,待测光波长为 800 nm ,取样光波长为 $3.4 \mu\text{m}$

Fig. 4 Calculated noncollinear angle and temporal window with a dependence on the grating period of PPLN. Black (red) lines represent the first (third)-order QPM. Inset shows the SFG-based correlator with a measured pulse at 800 nm and a sampling pulse at $3.4 \mu\text{m}$

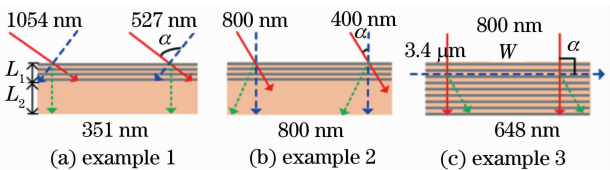


图 5 利用高阶 QPM 设计的三个互相关器。(a) 测量 1054 nm 激光的三阶互相关;(b),(c) 测量 800 nm 激光的 DFG、SFG 构型。红色实线表示待测光,蓝色虚线表示取样光,绿色点线表示相关光

Fig. 5 Schematic diagram of the three cross-correlation designs with high-order QPM. (a) Third harmonic generation configuration for measuring 1054 nm lasers; (b), (c) DFG and SFG configuration for measuring 800 nm lasers. Red solid (blue dashed) lines represent the pulse under test (the sampling pulse). Green dotted lines represent the generated correlation signal

表1 图5中三类设计的详细参数
Table 1 Specifications for the three designs in Fig. 5

No	m	$\Delta/\mu\text{m}$	L_1/mm	$\alpha/(\text{°})$	$\text{TW}^{\text{a}}/(\text{ps}/\text{cm})$	Resolution ^b /ps
1	5	4.0	0.25	58.6	69.6	0.40
2	5	4.0	0.25	33.0	39.4	0.87
3	3	4.9	×	90.0	69.2	0.60 ^c

^a TW is the temporal window per unit-crystal-width;

^b Resolution only referring to group-velocity-mismatch-induced time ambiguity;

^c Data corresponding to a 100- μm -wide sampling beam.

4 原理验证实验及工程应用

将以上提出的创新技术集成起来,研制了实验性样机,在实验室环境下验证了其可行性,并在实际拍瓦激光系统中获得了成功应用。

4.1 原理验证实验

选取图5(c)相关构型进行了原理验证实验^[19],系统装置如图6所示。钛宝石再生放大器输出的800 nm光作为待测激光,能量400 μJ ,脉宽80 fs。其中约80%用来抽运一个基于LiNbO₃的中红外飞秒OPA系统,产生干净的3.4 μm 取样光脉冲,能量约为10 μJ ,脉宽约为250 fs。剩余的20%待测光一维聚焦至约11 mm \times 150 μm 的光斑。相关晶体为10 mm宽、5 mm长、0.5 mm厚的掺MgO的PPLN晶体,极化周期为4.9 μm 。宽的待测光从PPLN的一个面垂直入射,取样光经聚焦从相邻的另一个面入射。产生的沿空间分布的648 nm的相关信号成像到FA端面。FA包含120根光纤,根据每根光纤中信号的强度不同加入不同大小的光纤衰减器。串行信号被PMT接收,PMT输出的电信号经过一个快速电子学放大器(10~20倍)后输入示波器。通过读出每个光纤通道的信号大小,结合各通道的衰减,即可得到相应的信噪比测量互相关曲线。如图7所示,时间窗口是70 ps,与理论计算符合(见表1)。测量的定标是通过在取样光束中加入一个2 mm厚的LiNbO₃晶体,观察其一级和二级反射引入的前沿信号,如图7曲线a所示。PPLN晶体反射引入的前沿假信号已被移至-138 ps,测量窗口内无测量引入的假信号。出现在-7 ps和-14 ps的两个小峰经检验均为待测脉冲携带的真实结构。为了标定系统的测量能力,将待测信号衰减至 3×10^7 倍,此时得到的测量结果见图7曲线c所示,它表明在当前的输入能量下(约400 μJ)系统的动态范围约为 10^9 。实验中取样光的光束口径为150 μm ,此时由表1可知时间分辨率约为900 fs。减小取样光的口径可进一步提高分辨率。

4.2 初步的工程应用

为了检验该技术路线真正单次测量的效果,搭建了1054 nm波长三倍频(THG)版本的三阶互相关仪来测量国家大型钕玻璃激光(每小时一发脉冲)的信噪比^[22],系统装置如图8所示。考虑到工程应用所特别需要的可靠性和实际可操作性,采用SHG产生干净的取样光脉冲。待测光束的70%用来产生倍频,倍频晶体为BBO,尺寸为15 mm \times 15 mm \times 5 mm。互相关晶体为BBO,尺寸为15 mm \times 15 mm \times 1.5 mm,相位匹配角为22°,后表面加工成3°楔角。互相关产生的信号处在紫外波段,常规光纤对其衰减太大,必须使用紫外光纤。测量结果如

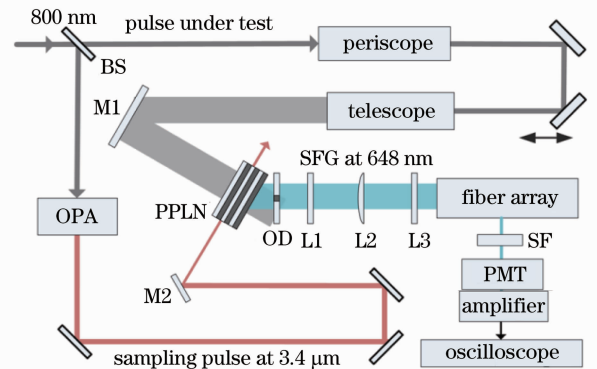


图6 原理验证实验装置图。BS为分束器,反射率80%;OD为点状衰减器;M1为柱平凹面镜,焦距为25 cm;M2为圆平凹面镜,焦距为25 cm;L1为竖直方向准直透镜,焦距15 cm;L2为水平方向成像透镜,焦距20 cm;L3为竖直方向聚焦透镜,焦距3 cm
Fig. 6 Schematic diagram of the proof-of-principle experiment. BS, beam splitter with a reflection of 80%; OD, a large glass plate with high reflection coating only in the center; M1 (M2) is a cylindrical concave (concave) mirror with $f = 25$ cm; L1 (vertical collimation), L2 (horizontal imaging), and L3 (vertical focusing) are cylindrical lens with $f = 15$ cm, 20 cm, and 3 cm, respectively

图 9 所示。由于没有采用长波长取样和周期极化晶体, 单次测量的窗口较小, 约为 30 ps。为了得到较大时间范围的信噪比信息, 连续进行了四次单次测量, 每次均将时间延迟前移 25 ps, 保证两次相邻窗口之间有 5 ps 的重叠区以便定标。由测量结果可知, 前沿 80 ps 处的信噪比约为 10^{-4} , 前沿 60~83 ps 信噪比曲线基本上是平坦的, 这显示了激光脉冲的噪声本底。

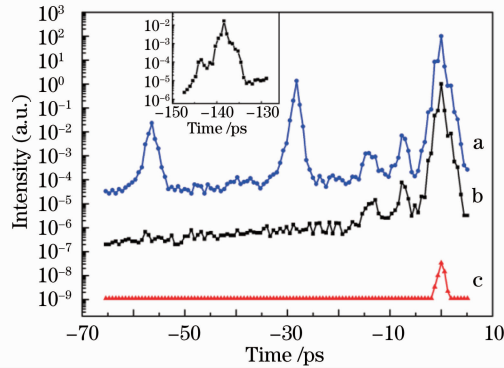


图 7 测量的钛宝石再生放大器输出的信噪比。曲线 a 为在取样光路中加入 2 mm 厚的标准具时的测量曲线, 对 100 进行归一化; 曲线 b 为正常的测量曲线; 曲线 c 为将待测光束衰减至 3×10^7 后的测量曲线。插图中是一级前沿假信号的测量结果

Fig. 7 Measured pulse contrast for the femtosecond Ti:sapphire laser curve a with (normalized to 100) and curve b without inserting a 2-mm-thick etalon in the arm of sampling pulse. Curve c trace with attenuating the pulse under test by 3×10^7 times. Inset is the time-delayed measurement of pre-artifact

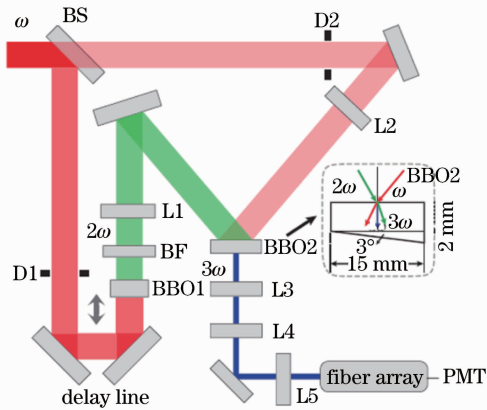


图 8 1054 nm 激光信噪比单次测量装置图

Fig. 8 Apparatus for measuring the pulse contrast of Nd:glass laser at 1054 nm

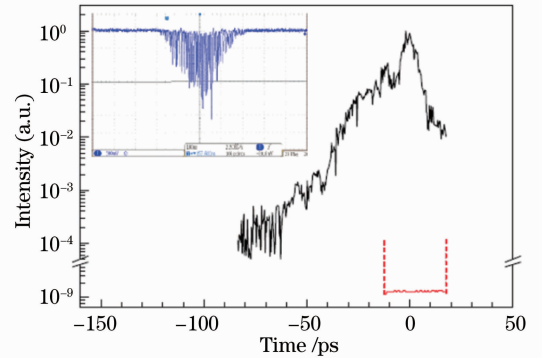


图 9 黑线为脉冲信噪比曲线, 在不同的时间延时测量了 4 次, 每次有 5 ps 左右的重叠区。红线是系统的背景噪音 (-13~17 ps)。蓝线是其中一次测量 (-13~17 ps) 的示波器屏幕截图

Fig. 9 Black line shows the pulse profile obtained by integrating four shots of measurements at different time delays. Each window has a overlap region of about 5 ps. The red line is the measured background noise (from -13 ps to 17 ps). Inset shows the screenshot of one measurement (from -13 ps to 17 ps) from the oscilloscope

5 结束语

提出的信噪比单次测量的核心技术有三项: 灵活设计的 QPM 互相关过程, 基于光纤阵列和光电倍增管的高灵敏并行探测系统, 以及基于 OPA 的长波长取样光脉冲。通过这三项创新技术, 可以使脉冲信噪比的单次测量能力, 达到与扫描性测量方式相媲美的程度。

脉冲信噪比单次测量是个综合性的系统, 需要在应用中发现新问题来不断改进。尽管我们研制的信噪

比单次测量原型机已经获得初步应用,但仍有很大的提升空间。目前正在考虑如何进一步改进信噪比测量方式,使其更简单、更易操作。只有不断地探索和创新,才能使信噪比单次测量仪真正走向实际应用。

参 考 文 献

- 1 D Umstadter. Review of physics and application of relativistic plasma driven by ultra-intense lasers[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 8(5):1774–1785.
- 2 N Forget, A Cotel, E Brambrink, *et al.*. Pump-noise transfer in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(21): 2921–2923.
- 3 C Dorrer. Analysis of pump-induced temporal contrast degradation in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(12): 3048–3057.
- 4 N V Didenko, A V Konyashchenko, A P Lutsenko, *et al.*. Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses[J]. *Opt Express*, 2008, 16(5): 3178–3190.
- 5 D N Schimpf, E Seise, J Limpert, *et al.*. The impact of spectral modulations on the contrast of pulses of nonlinear chirped-pulse amplification systems[J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10664–10674.
- 6 H Kiriya, T Shimomura, H Sasao, *et al.*. Temporal contrast enhancement of petawatt-class laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2006, 37(16): 3363–3365.
- 7 A Jullien, O Albert, F Burgy, *et al.*. 10^{-10} temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(8): 920–922.
- 8 Y Huang, C Zhang, Y Xu, *et al.*. Ultrashort pulse temporal contrast enhancement based on noncollinear optical-parametric amplification[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(6): 781–783.
- 9 P Yuan, G Xie, D Zhang, *et al.*. High-contrast near-IR short pulses generated by a mid-IR optical parametric chirped-pulse amplifier with frequency doubling[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1878–1880.
- 10 J Ma, P Yuan, Y Wang, *et al.*. Numerical study on pulse contrast enhancement in a short-pulse-pumped optical parametric amplifier[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(21–22): 4531–4536
- 11 K-H Hong, B Hou, J A Nees, *et al.*. Generation and measurement of $>10^8$ intensity contrast ratio in a relativistic kHz chirped-pulse amplifier laser[J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(4): 447–457.
- 12 E J Divall, I N Ross. High dynamic range contrast measurements by use of an optical parametric amplifier correlator[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(19): 2273–2275.
- 13 J Collier, C Hernandez-Gomez, R Allott, *et al.*. A single-shot third-order autocorrelator for pulse contrast and pulse shape measurements[J]. *Laser Part Beams*, 2001, 19(2): 231–235.
- 14 G Priebe, K A Janulewicz, V I Redkorechev, *et al.*. Pulse shape measurement by a non-collinear third-order correlation technique[J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 848–851.
- 15 I Jovanovic, C Brown, C Haefner, *et al.*. High-dynamic-range, 200-ps window, single-shot cross-correlator for ultrahigh intensity laser characterization[C]. *CLEO/QELS*, 2007. JThD137.
- 16 R C Shah, R P Johnson, T Shimada, *et al.*. Large temporal window contrast measurement using optical parametric amplification and low-sensitivity detectors[J]. *Eur Phys J D*, 2009, 55(2): 305–309.
- 17 C Dorrer, J Bromage, J D Zuegel. High-dynamic-range single-shot cross-correlator based on an optical pulse replicator[J]. *Opt Express*, 2008, 16(18): 13534–13544.
- 18 J Ma, P Yuan, Y Wang, *et al.*. Single-shot cross-correlator using a long-wavelength sampling pulse[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(6): 978–980.
- 19 J Ma, Y Wang, P Yuan, *et al.*. Single-shot pulse-contrast measurement based on high-order quasi-phase-matching cross-correlation[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(21): 4486–4488.
- 20 D Zhang, L Qian, P Yuan, *et al.*. Fiber-array-based detection scheme for single-shot pulse contrast characterization[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(17): 1969–1971.
- 21 Y Wang, P Yuan, J Ma, *et al.*. Scattering noise and measurement artifacts in a single-shot cross-correlator and their suppression[J]. *Appl Phys B*, 2013, 111(3): 501–508.
- 22 Wang Yongzhi, Ouyang Xiaoping, Ma Jingui, *et al.*. First application of single-shot cross-correlator for characterizing Nd: glass petawatt pulses[J]. *Chin Phys Lett*, 2013, 30(2): 024201