

# 皮秒拍瓦激光的参数测量系统可靠性分析

欧阳小平<sup>1</sup> 杨琳<sup>1\*</sup> 彭永华<sup>1</sup> 陈明<sup>2</sup> 马金贵<sup>3</sup> 王永志<sup>3</sup> 唐顺兴<sup>1</sup>  
刘崇<sup>1</sup> 李红<sup>1</sup> 王宇煜<sup>1</sup> 钱列加<sup>4</sup> 朱俭<sup>2</sup> 朱宝强<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800  
<sup>2</sup>中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800  
<sup>3</sup>复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433  
<sup>4</sup>上海交通大学理学院物理系, 上海 200240

**摘要** 皮秒参数测量系统用于提供皮秒拍瓦激光系统的各项状态参数, 协助激光系统达到预期的技术指标。针对皮秒拍瓦激光系统的技术指标, 皮秒参数测量系统将提供压缩脉冲的能量、脉宽、远场、信噪比等参数。为了判断参数测量系统的工作性能, 采用均方根(RMS)误差来描述测量系统的可靠性。经过实验测试, 能量测量单元的测量范围为 10~1000 J, 标定实验数据的 RMS 误差为 2.2%。脉宽测量单元的时间测量范围为 0.5~18.0 ps, 时间分辨率为 0.07 ps, 测试数据的 RMS 误差为 3%。远场测量单元的空间测量范围为 150 倍衍射极限(DL), 空间分辨率为 0.3 倍 DL, 测试数据的 RMS 误差为 0.15%。信噪比测量单元的时间测量范围为 30 ps, 时间分辨率为 0.3 ps, 动态范围为 10<sup>6</sup>。基于拍瓦实验提供的测试数据表明, 皮秒参数测量系统能够稳定可靠地提供以上参数的实时测试数据, 实现拍瓦装置的运行状态诊断功能。

**关键词** 超快光学; 精密测试; 自相关; 单次脉冲

中图分类号 TL65+3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0108003

## Analysis on Reliability of Diagnostics System for Picosecond Petawatt Laser

Ouyang Xiaoping<sup>1</sup> Yang Lin<sup>1</sup> Peng Yonghua<sup>1</sup> Chen Ming<sup>2</sup> Ma Jingui<sup>3</sup>  
Wang Yongzhi<sup>3</sup> Tang Shunxing<sup>1</sup> Liu Chong<sup>1</sup> Li Hong<sup>1</sup> Wang Yuyu<sup>1</sup>  
Qian Liejia<sup>4</sup> Zhu Jian<sup>2</sup> Zhu Baoqiang<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China  
<sup>3</sup>School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China  
<sup>4</sup>Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Picosecond diagnostics system is used to provide parameters of laser facility and help it to achieve designed technical aim. This system will diagnose parameters of compressed pulse for petawatt laser such as energy, pulse width, farfield, and pulse contrast. Root-mean-square (RMS) error is adopted to describe stability of diagnostics system in order to test its performance. Energy measurement range is 10~1000 J, RMS error of calibration data is 2.2%. Pulse width measurement range is 0.5~18.0 ps, temporal resolution is 0.07 ps for Gaussian type pulse, and data RMS error is 3%. Farfield measurement range is 150 diffraction limitation (DL), spatial resolution is 0.3 DL,

收稿日期: 2012-07-06; 收到修改稿日期: 2012-09-07

基金项目: 国家专项基金(1019631-A00)资助课题。

作者简介: 欧阳小平(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率激光参数测量方面的研究。

E-mail: oyxp@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事高功率激光总体技术方面的研究。E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: axiulwt@hotmail.com

and RMS error is 0.15%. Pulse contrast measurement range is 30 ps, temporal resolution is 0.3 ps, and dynamic range is  $10^6$ . In experiments on petawatt laser, picosecond diagnostics system provides these parameters instantaneously and successfully to analyze petawatt laser facility's performance.

**Key words** ultrafast optics; precise diagnostics; auto-correlation; single shot pulse

**OCIS codes** 320.5390; 320.7100; 120.4640

## 1 引 言

随着超短激光技术的发展和快点火的应用需求,世界上多个国家竞相建造了各自的拍瓦激光装置。已经建成的包括美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 Nova 装置、OMEGA EP 装置、英国的 Vulcan 装置、日本的 GEKKO XII 装置等。这些大型超短激光装置都研制了相应的皮秒脉冲激光诊断系统,并发展了相关的皮秒脉冲精密诊断技术。美国罗切斯特大学的 OMEGA EP 装置输出的压缩脉冲能量为 2600 J,脉冲宽度调节范围为 0.5~100.0 ps。

OMEGA EP 诊断系统提供能量、脉宽、信噪比、焦斑、光束质量、光谱、波前、准直、光学元件损伤等分析诊断功能<sup>[1]</sup>。脉冲宽度的测量方案,是采用自相关技术测量 0.4~12.0 ps 范围的超短脉冲的宽度。焦斑的测量方案,是在离线方式下标定焦斑测量单元、远场测量单元和波前测量单元之间的函数变换关系,通过波前换算值和远场测量图像来实现焦斑的实时分析功能<sup>[2,3]</sup>。

基于神光 II 的千焦耳拍瓦激光系统将通过光栅拼接组成的压缩器<sup>[4]</sup>,实现能量为 1000 J、脉宽为 1~10 ps、聚焦功率密度为  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>、信噪比为  $10^6\sim 10^8$  的输出能力。为了协助拍瓦激光装置的建设 and 调试,确保技术指标的实现,专用的皮秒参数测量系统将用于提供皮秒拍瓦激光的压缩脉冲的能量、脉宽、远场、信噪比等参数的诊断和分析功能。

为了实现精密准确的测量功能,参数测量系统首先需要减小或消除随机误差和系统误差,提高测试数据的稳定性和可靠性。在精密测量的数据统计和处理过程中,均方根(RMS)误差反应测量数据偏移真实值的程度,RMS 误差越小,说明测量精度越高。因此本文将采用 RMS 误差来分别描述测量系统各个单元的测试数据可靠性,作为判断参数测量系统工作性能的一个依据。

## 2 能量测量单元

神光 II 皮秒拍瓦激光的设计目标是输出能量达到 1000 J、脉宽为 1~10 ps、直径为 320 mm。如果通过直径为 400 mm 玻璃窗口输出到空气中使用常

规方案进行能量测量,功率密度为 12.4 GW/cm<sup>2</sup> 的拍瓦激光经过厚度为 40 mm 的玻璃窗口产生的  $B$  积分为 87.2。如此高的  $B$  积分会产生强烈的自聚焦和吸收效应,甚至破坏。所以准确可靠的测量方案是在真空环境下测量其绝对能量。由于目前真空能量计无法使用,所以只能通过玻璃窗口将皮秒拍瓦激光引导到空气中,由常规能量计进行绝对能量的测量。在此前提条件下,需要考虑  $B$  积分和材料破坏的可能性,避免玻璃窗口的吸收和损伤对测量精度的影响。一旦玻璃窗口出现损伤,该损伤点就会持续扩大,绝对能量和取样能量之间的比例系数就会出现极大的不稳定性,降低参数测量系统的可靠性。

皮秒啁啾脉冲的能量测量单元,由取样能量计、相应的取样和传输光路、接收面尺寸为 400 mm×400 mm 的大口径能量计组成,如图 1 所示。图 1 中,SF8 为空间滤波器,G1、G2、G3、G4 为压缩光栅,lens1 和 lens2 为透镜,组成参数测量系统的约束系统,BS1、BS2、BS3 为分光镜。大口径能量计测量的绝对能量为  $E_0$ ,考虑到窗口前后表面的 4% 反射损耗,吸收损耗  $\delta_{\text{absorb}}$ <sup>[5]</sup> 为

$$\delta_{\text{absorb}} = 1 - \exp(-\alpha z), \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为玻璃材料的光吸收系数,通常情况下为 0.008, $z$  为玻璃材料的厚度。测量得到真空窗口之后的绝对能量  $E_0$  之后,就可以计算出入射到离轴抛物面镜上的能量  $E_P$  为

$$E_P = E_0 / (1 - 4\% - 4\% - \delta_{\text{absorb}}), \quad (2)$$

当激光装置正式投入使用时,无法在主光路中设置大口径能量计测量每一发次的能量,因此需要设计取样光路和取样能量计。取样光路中的能量计,测量得到的取样能量为  $E_S$ 。 $E_P$  和  $E_S$  两者之间存在的关系  $k$ ,需要通过标定实验来完成,即

$$E_P = kE_S, \quad (3)$$

式中  $k$  为定标系数。

为了避免石英窗口的损坏,需要考虑自聚焦效应可能造成的损伤,控制定标实验中压缩脉冲输出的最大能量。评估自聚焦效应的一个重要参数是  $B$  积分,即

$$B(\tau, r) = (2\pi/\lambda) \int n_2 I(\tau, r) dz, \quad (4)$$

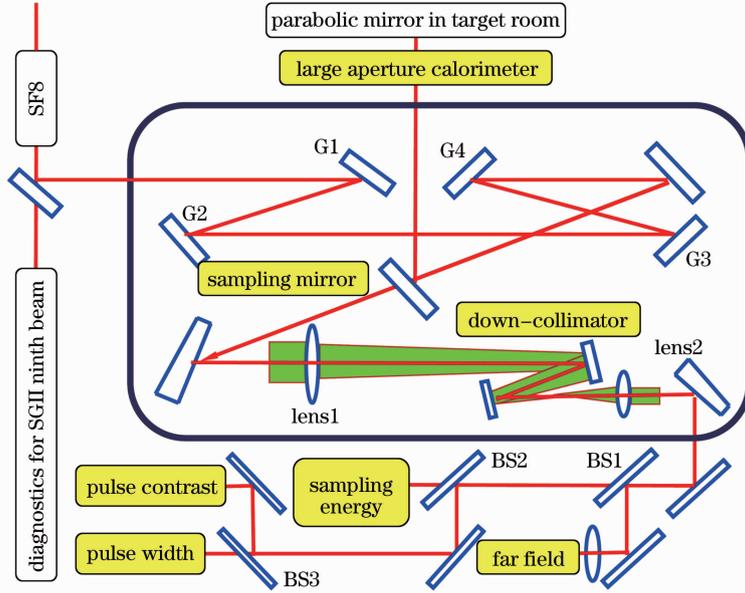


图1 皮秒参数测量系统原理图

Fig.1 Schematic of diagnostics for picosecond pulse

式中  $\tau$  为脉冲宽度,  $r$  为光束横截面上的极坐标,  $\lambda$  为波长,  $n_2$  为非线性折射率,  $z$  为光学介质的厚度,  $I(\tau, r)$  为被测脉冲光强分布。忽略石英窗口的损耗和不均匀性,  $I(\tau, r)$  即为常数。石英材料的非线性折射率  $n_2'$  为  $1 \times 10^{-13}$  esu(静电单位)<sup>[6]</sup>, 国际单位制下的非线性折射率  $n_2$  换算方法为<sup>[7]</sup>

$$n_2 = n_2' 40\pi / (cn_0), \quad (5)$$

式中  $c$  为真空中光速,  $n_0$  为石英玻璃的折射率。

实验中, 石英玻璃的折射率  $n_0$  为 1.5, 光速  $c$  取  $3 \times 10^8$  m/s, 波长为 1.053 nm, 石英窗口厚度  $z$  为 4 cm, 脉冲宽度取 4 ps。为了避免自聚焦产生的材料破坏, 需要将  $B$  积分控制在 3.94 以内<sup>[8]</sup>。根据(4)、(5)式可以计算出, 压缩脉冲的能量尽可能控制在 60 J 以内。实验过程中没有发现玻璃窗口的损伤。实验数据如表 1 所示。从表 1 的数据分析可以发现, 定标系数的平均值为 1.8 J/ $\mu$ J, RMS 误差为 2.2%, 说明能量测量单元的测试数据具有良好的稳定性和可靠性。

表1 能量标定实验数据的可靠性

Table 1 Reliability of calibration test data

Time	$E_s/\mu$ J	$E_o$ /J	$E_p$ /J	$k/(J/\mu$ J)
20110706-17:27	21.45	33.5	37.70	1.76
20110706-19:41	29.1	47.87	53.88	1.85
20110706-21:45	35.1	55.87	62.88	1.79

### 3 脉冲宽度测量单元

皮秒啁啾脉冲宽度的精密测量, 是基于二阶自

相关原理, 将被测脉冲分成相同的两个子光束, 在它们之间引入时间延迟量, 然后将两个子光束投射到同一块非线性晶体上, 利用非线性作用实现二阶自相关过程。图 1 中脉宽测量单元采用的皮秒自相关仪, 型号为 PsWidth20<sup>[9,10]</sup>, 已经在 1030 nm 的激光系统中得到了应用<sup>[11]</sup>。

对于被测脉冲  $I(t)$ , 其自相关信号为

$$I_A(\tau) = \int I(t)I(t - \tau_1)dt, \quad (6)$$

式中  $\tau_1$  为时间延迟量。当被测脉冲  $I(t)$  为高斯脉冲时,

$$I(t) = I_0 \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{t^2}{\tau_{FWHM}^2}\right)\right], \quad (7)$$

式中  $I_0$  为脉冲的光强, 在皮秒脉冲的时间宽度测试中, 可以认为  $I_0 = 1$ 。  $\tau_{FWHM}$  为被测脉冲的半峰全宽(FWHM)。基于(6)、(7)式可以得到相应的自相关信号为

$$I_A(t) = \exp\left\{-4\ln 2 \left[\frac{t^2}{(\sqrt{2}\tau_{FWHM})^2}\right]\right\}. \quad (8)$$

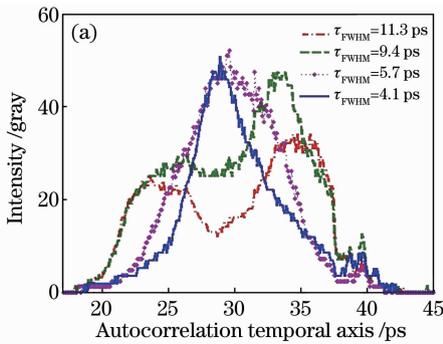
根据(8)式, 可以推导出自相关信号的 FWHM 为  $\sqrt{2}\tau_{FWHM}$ , 即自相关信号的宽度是被测脉冲宽度的  $\sqrt{2}$  倍。

在重复频率的超短脉冲测试中, 可以基于大量脉冲的统计平均值, 动态地改变时间延迟  $\tau$ , 从而得到一条自相关曲线<sup>[12,13]</sup>。为了能够实现单次脉冲的测量, 只能采用倾斜相交的两束子光束, 基于分波前原理, 在空间上的不同位置, 产生不同的时间延

迟<sup>[14~16]</sup>。

在拍瓦实验中,随着压缩器的调整,皮秒自相关仪得到的脉冲宽度也在不断变化,如图 2(a)所示,被测脉冲的宽度分别 11.3、9.4、5.7、4.1 ps。通过研究图 2(a)的自相关曲线可以发现,啁啾脉冲具有一个双峰结构( $\tau_{FWHM} = 11.3$  ps 和 9.4 ps),表示在脉冲的光谱相位上具有两个相对较强的部分,通过压缩器的精密调整,它们被修正到等相位面附近之后,脉冲的双峰逐渐向中间靠拢( $\tau_{FWHM} = 5.7$  ps),最终合并成一个类高斯型曲线( $\tau_{FWHM} = 4.1$  ps)。

从图 2(a)还可以发现,当脉宽分别为 11.3 ps、



9.4 ps 时曲线的边缘非常陡峭,与高斯型曲线没有相似性。因为 PsWidth20 型皮秒自相关仪的时间范围为 26 ps,换算成高斯型被测脉冲之后的时间范围为 18.4 ps。所以当被测脉冲的宽度接近 18 ps 时,有限的测量窗口会对曲线产生截断效应,引入系统误差。根据(8)式开展高斯型被测脉冲的自相关曲线的模拟分析,结果如图 2(b)所示。高斯线型引入的系统误差可以表示为

$$\Delta = (\tau_{\text{measure}} - \tau_{FWHM}) / \tau_{FWHM}. \quad (9)$$

式中  $\Delta$  表示测量误差, $\tau_{\text{measure}}$  表示有限测量窗口条件下得到的测量结果。

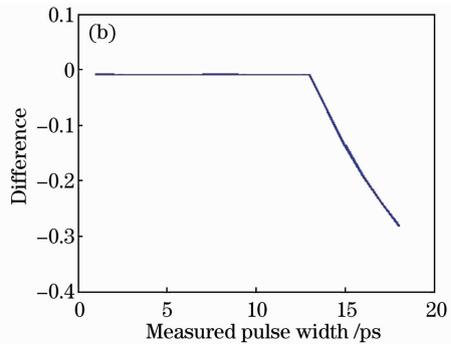


图 2 脉宽测量单元。(a) PsWidth20 测试数据;(b)高斯线型脉冲产生的误差

Fig. 2 Pulse width measurement unit. (a) Test data of PsWidth20; (b) difference from Gaussian shape pulse

从图 2(b)可以观察到,当被测脉冲宽度为 1~13 ps 时,测量数据的系统误差小于 1%。该系统误差来自于 $\sqrt{2}$  取值为 1.414 的计算过程中。当被测脉冲宽度大于 13 ps 时,高斯线型引入的系统误差开始增加。比如,被测脉冲为 14 ps 时,测量数据的系统误差为 7.5%。在激光参数的精密测量中,测量误差应当控制在 5% 以内。因此,当被测脉冲为高斯型时,该皮秒自相关仪适用于测量脉冲宽度为 1~13 ps 的啁啾脉冲。测量范围与千焦耳拍瓦激光系统的脉宽技术指标 1~10 ps 相吻合,能够满足皮秒参数测量系统的功能需求。

实验中拍瓦激光系统还发射了 4 次中等能量(约为 75 J)的脉冲,用于信噪比测量研究工作。为了提高信噪比测量数据的可靠性,拍瓦激光系统在该 4 发次中尽可能保持状态不变。因此这 4 发次的激光脉冲也被用于考核皮秒脉宽测量单元的测试数据的可靠性。表 2 列出了该 4 发次中等能量激光脉冲的脉冲宽度测量数据,脉宽平均值为 3.9 ps。由于脉宽小于 13 ps,忽略高斯线型引入的系统误差。

分析表 2 可以看出,当压缩器保持不变时,皮秒自相关仪的测试数据保持了相当良好的稳定性,多次测量数据的脉冲宽度平均值为 3.9 ps,RMS 误差

为 3%。综上所述,脉宽测量单元的测量结果是稳定可靠的。

表 2 脉宽测量单元的测试数据的可靠性

Table 2 Reliability of test data of pulse width measurement unit

Time	Pulse width / ps
20120525-10:59	4.0
20120525-14:39	3.9
20120525-17:05	3.9
20120525-19:25	3.7

### 3 远场测量单元

为了实现拍瓦激光的焦斑监测功能,研究拍瓦激光的可聚焦能力,在皮秒参数测量系统中设计有远场测量单元,实现取样光束的实时监测功能。焦斑测量单元被设置在靶室焦点附近,其优点在于能够直接测量分析焦平面处的焦斑分布特性,缺点在于无法实现正式运行时的实时监测功能。通过标定焦斑测量单元和远场测量单元的测量图像的相似程度,能够弥补该缺点,实现靶面焦斑的实时分析和诊断功能。

考虑到焦斑可能存在的不规则分布,为了能够准确地判断远场测量单元和焦斑测量单元的测量图

像的相关性,按测量图像的长、短轴方向进行正交分解。通过以上处理方法,定义远场测量单元和靶面测量单元的相似度  $f(l, s, E)$  为

$$f(l, s, E) = [R(l) + R(s) + R(E)]/3, \quad (10)$$

式中  $l$  表示长轴方向的坐标,  $s$  表示短轴方向的坐标,  $R(l)$  表示焦斑图像和远场图像在长轴方向强度-坐标曲线的相关系数,  $R(s)$  表示焦斑图像和远场图像在短轴方向上强度-坐标曲线的相关系数,  $R(E)$  表示焦斑图像和远场图像的环围能量曲线的相关系数。相关系数  $R(l)$ 、 $R(s)$ 、 $R(E)$  的计算方法为

$$R(l) = C[I_{\text{far}}(l), I_{\text{focal}}(l)] / \sqrt{C[I_{\text{far}}(l), I_{\text{far}}(l)]C[I_{\text{focal}}(l), I_{\text{focal}}(l)]}, \quad (11)$$

$$R(s) = C[I_{\text{far}}(s), I_{\text{focal}}(s)] / \sqrt{C[I_{\text{far}}(s), I_{\text{far}}(s)]C[I_{\text{focal}}(s), I_{\text{focal}}(s)]}, \quad (12)$$

$$R(E) = C[I_{\text{far}}(E), I_{\text{focal}}(E)], \quad (13)$$

式中  $I_{\text{far}}(l)$ 、 $I_{\text{focal}}(l)$  分别为远场、焦斑图像中长轴方向的强度-坐标分布曲线,  $I_{\text{far}}(s)$ 、 $I_{\text{focal}}(s)$  分别为远场、焦斑图像中短轴方向的强度-坐标分布曲线,  $I_{\text{far}}(E)$ 、 $I_{\text{focal}}(E)$  分别为远场、焦斑图像中的环围能量曲线。函数  $C(x, y)$  表示变量  $x$  和  $y$  的协方差, 当两条曲线完全相似时,  $f(l, s, E) = R(l) = R(s) = R(E) = 1$ 。

由于焦斑测量单元暂时无法提供测量图像的数值数据, 因此采用远场测量单元的多次测量数据来判断测量系统的工作性能。具体方法是比较正式实验中的后 3 发次的远场数据(a2、a3、a4、b2、b3、b4、c2、c3、c4)和第一发次的远场数据(a1、b1、c1)之间的相似度函数  $f(l, s, E)$  的标准偏差, 如图 3 和表 3 所示。从表 3 分析可知, 相似度平均值为 0.995, RMS 误差为 0.15%。

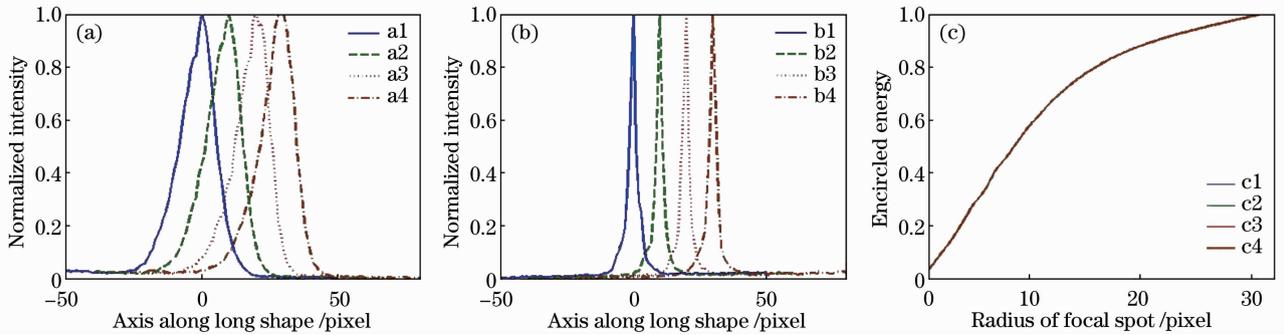


图 3 远场测量单元性能测试实验。(a)长轴强度分布;(b)短轴强度分布;  
(c)环围能量曲线

Fig. 3 Performance test of far-field measurement unit. (a) Intensity along long shape; (b) intensity along short shape; (c) encircled energy curve along radius

表 3 远场测量单元测试数据的可靠性

Table 3 Reliability of test data of far field measurement unit

Time	$R(l)$	$R(s)$	$R(E)$	$f(l, s, E)$
20120525-10:59	—	—	—	—
20120525-14:39	0.997	0.994	1	0.997
20120525-17:05	0.996	0.990	1	0.995
20120525-19:25	0.992	0.990	1	0.994

由于焦斑测量单元目前无法通过数值数据实现(10)式所期望的精密分析功能, 一个简化的相似度函数  $f'(l, s)$  被用来描述远场测量单元和焦斑测量单元之间的关联度, 表示为

$$f'(l, s) = (\omega_{l, \text{far}} / \omega_{s, \text{far}}) / (\omega_{l, \text{focal}} / \omega_{s, \text{focal}}), \quad (14)$$

式中  $\omega_{l, \text{far}}$ 、 $\omega_{l, \text{focal}}$  分别为远场测量单元和焦斑测量单元中的长轴方向上峰值强度 5% 位置处的底宽,  $\omega_{s, \text{far}}$ 、 $\omega_{s, \text{focal}}$  分别为远场测量单元和焦斑测量单元

中的短轴方向上峰值强度 5% 位置处的底宽。

实验中采用波像差 0.8λ 的平面波标定远场测量单元的工作性能, 其中远场测量单元的焦点尺寸为 3 pixel。远场测量单元的标定实验图像如图 4(a) 所示。图 4(a) 中竖直方向上的线条, 是 CCD 在帧转移过程中受到连续光源的照射产生的背景噪声。远场测量单元中, 科学级 CCD 的像素尺寸为 20 μm × 20 μm, 焦点尺寸为 60 μm。远场测量单元的主透镜的焦距为 8835 mm, 对应的艾里斑大小为 70 μm。考虑到像素数的计算误差, 可以认为标准平面波在远场测量单元中得到的焦点大小即为 1 倍衍射极限(DL)。因此, 每个像素代表 0.3 倍 DL, 即分辨率为 0.3 倍 DL。科学级 CCD 的像素数为 512 pixel × 512 pixel, 测量范围即为 150 倍 DL。在线测试结果如图 4(b)、(c) 所示, 远场测量图

像的长轴方向光斑宽度  $\omega_{l, \text{far}}$  为 45 pixel, 短轴方向光斑宽度  $\omega_{s, \text{far}}$  为 16 pixel。焦斑测量图像的长轴方向宽度  $\omega_{l, \text{focal}}$  和短轴方向宽度  $\omega_{s, \text{focal}}$  的比值为 7:1。根据(14)式, 可以计算出远场测量单元和焦斑测量单元的相似度  $f'(l, s)$  为 0.43。可以发现, 当前的远场测量单元和焦斑测量单元的测量图像之间已经

存在了比较好的相似度。两者之间的相似度偏低, 是因为焦斑测量单元的测试中, 为了研究旁瓣分布从而使焦斑的中心位置饱和, 无法准确定位峰值的 5% 强度位置, 光斑宽度的计算值  $\omega_{l, \text{focal}}$ 、 $\omega_{s, \text{focal}}$  存在误差。另一个原因, 是取样测量的光路与主光路之间的波面形状不可能完全一样。

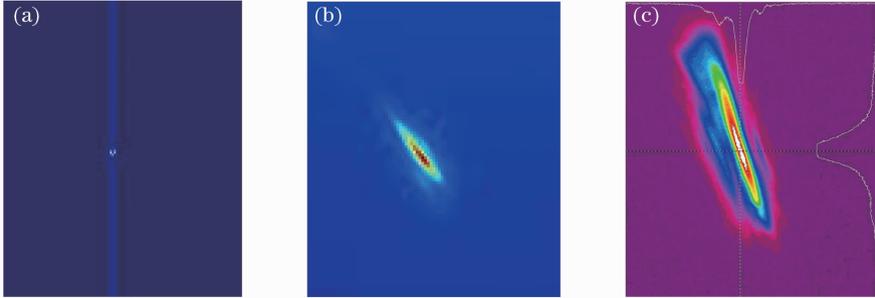


图 4 远场测量单元验证实验。(a)远场测量单元的标定实验测量图像;(b)远场测量单元联机实验测试数据;(c)焦斑测量单元联机实验测试数据

Fig. 4 Testify of far-field measurement unit. (a) Calibration test data of far-field measurement unit; (b) online test data of far-field measurement unit; (c) online test data of focal spot measurement unit

#### 4 信噪比测量单元

皮秒拍瓦激光的信噪比是一项非常重要的参数, 影响着快点火等物理实验的作用效果。而且单次脉冲的高动态范围信噪比测量技术也是一项世界性的难题。本课题组于 2008 年使用光电倍增管 (PMT) 实现了高动态范围的信噪比测量<sup>[12]</sup>。张福领等<sup>[17]</sup>开展了后续的研究工作, 于 2009 年发表了针对飞秒振荡器输出脉冲的高动态范围信噪比测量的技术方案。Zhang 等<sup>[18]</sup>在 2008 年发表了采用光纤阵列实现单次脉冲的高动态范围信噪比测量的技术方案。Ma 等<sup>[19]</sup>在 2011 年提出了长波长取样技术, 降低超高功率的扫描脉冲在互相关用非线性晶体中产生的参量荧光噪声, 提高了测量系统的动态范围。

信噪比测量的技术方案的特点在于: 基于互相关原理实现脉冲前沿和后沿的分辨功能, 通过 PMT 的极高灵敏度实现高动态范围的探测能力, 并且通过宽光束的非共线方式实现单次脉冲的实时诊断功能。神光 II 装置中的前端抽运源激光系统 (1.4 mJ、10 ps、1 Hz) 的信噪比测试数据如图 5(a) 所示, 拍瓦激光系统 (50 J、4 ps) 的信噪比测量数据如图 5(b) 所示。图 5(a) 中, 曲线 noise 1 和 noise 2 为环境中的紫外线和电路干扰综合作用下的背景噪声。通过改进仪器的密封结构, 控制杂散光和电路噪声, 可以将背景噪声降低 3 个数量级 (从 noise 1 降低到 noise 2)。目前重复频率的信噪比测量仪的动态范围为  $10^7$ 。图 5(b) 中的信噪比曲线, 是由 4 发次、能量约为 70 J 的激光脉冲的测量结果进行拼接得到

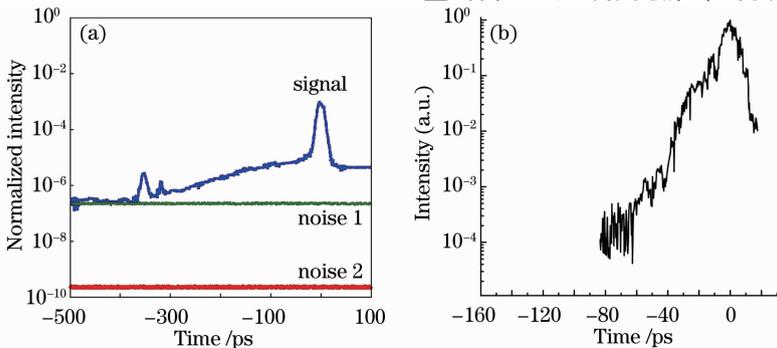


图 5 信噪比测量单元。(a)重复频率脉冲信噪比测量仪测试数据;(b)单次脉冲信噪比测量仪 4 发次测试数据

Fig. 5 Pulse contrast measurement unit. (a) Experimental datas of pulse contrast measurement for repetition pulses; (b) experimental datas of four pulse contrast measurements for single shot pulse

的。为了得到 100 ps 的时间范围,实验中保持拍瓦激光系统的输出能量不变,通过改变测量仪器内部的时间延迟器来测量 4 个不同的时间位置,最后将数据加以拼接和处理。实现高动态范围的单次皮秒脉冲信噪比测量的难点在于互相关信号的转换效率。下一步需要研究互相关作用过程的转换效率,通过提高调试精度、使用角度不敏感的非线性晶体等技术手段,提高信噪比曲线峰值的强度,从而将动态范围提升到  $10^{10}$  以上。

## 5 结 论

针对皮秒拍瓦激光系统的研究发展目标,皮秒参数测量系统开展了压缩脉冲的能量、脉宽、远场、信噪比等参数的精密诊断功能研究。目前能量和脉宽测量单元已经初步完成,远场测量单元和信噪比测量单元还处于调试阶段。能量测量单元的测量范围为 10~1000 J,能量标定实验数据的 RMS 误差为 2.2%。脉宽测量单元的时间测量范围为 0.5~18.0 ps,时间分辨率为 0.07 ps,测试数据的 RMS 误差为 3%。远场测量单元的空间测量范围为 150 倍 DL,空间分辨率为 0.3 倍 DL,测试数据的 RMS 误差为 0.15%,与焦斑测量单元的相似度为 0.43。下一步需要研究远场测量单元和焦斑测量单元的光束传输和数值分析方法,将远场测量单元和焦斑测量单元的相似度提高到 90% 以上<sup>[3]</sup>,从而能够通过远场测量单元实现靶点位置的焦斑形态的实时监测和分析,为物理实验过程的精密分析提供依据。目前单次脉冲的信噪比测量单元的时间测量范围为 30 ps,时间分辨率为 0.3 ps,动态范围为  $10^6$ 。考虑到皮秒拍瓦激光脉冲信噪比分布的复杂性,需要发展新的技术手段来分析主脉冲之前 10 ps 位置到 1000 ps 位置之间的信噪比特性。这是一个具有很大技术难度的工作,也是下一步的工作重点。初步的解决方案,是采用脉冲复制器方案实现时间范围为 500 ps 的信噪比特性监测<sup>[20]</sup>,采用高灵敏度光电管实现时间范围为 1000 ps 的信噪比特性监测<sup>[21]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 J. D. Zuegel, Bahk Seung-Whan, J. Bromage *et al.*. Novel laser and diagnostic technologies for the OMEGA EP high-energy petawatt laser[J]. *Rev. Laser Engng.*, 2009, **37**(6): 437~442
- 2 J. Bromage, S. W. Bahk, D. Irwin *et al.*. A focal-spot diagnostic for on-shot characterization of high-energy petawatt lasers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 16561~16572
- 3 B. E. Kruschitz, S. W. Bahk, J. Bromage *et al.*. Improved on-shot focal spot diagnosis on the OMEGA EP short-pulse laser

- system[C]. CLEO San Jose, CA, 2010
- 4 Xia Lan, Yang Xuedong, Xu Guang *et al.*. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308001
- 夏 兰, 杨学东, 徐 光 等. 光栅拼接旋转误差监测系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0308001
- 5 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Tang Shunxing *et al.*. Calibration of pulse signal-to-noise ratio measurement for femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 945~948
- 欧阳小平, 张福领, 唐顺兴 等. 短脉冲激光信噪比测量的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 945~948
- 6 J. T. Fournier, E. Snitzer. The nonlinear refractive index of glass [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**(5): 473~475
- 7 Xing Lu, Qingcao Liu, Zuoye Liu *et al.*. Measurement of nonlinear refractive index coefficient using emission spectrum of filament induced by gigawatt-femtosecond pulse in BK7 glass[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(12): 2045~2050
- 8 J. A. Fleck, J. R. Morris, E. S. Bliss. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(5): 353~363
- 9 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua *et al.*. Research on precise diagnostics for pico-second single shot pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0408003
- 欧阳小平, 杨 琳, 彭永华 等. 皮秒自相关仪的性能测试研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0408003
- 10 Xiaoping Ouyang, Jingui Ma, Lin Yang *et al.*. Accuracy of single-shot autocorrelation measurements of petawatt laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(18): 3989~3994
- 11 Qu Yexi, Pan Xue, Huang Wenfa *et al.*. 1030 nm picosecond level optical parametric chirp pulse amplification pump [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0802003
- 瞿叶玺, 潘 雪, 黄文发 等. 1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0802003
- 12 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond [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
- 13 Xu Qinfeng, Liu Qiong, Ye Qing *et al.*. Auto-correlator for ultra-short pulse laser measurement based on optical fiber devices [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1607~1612
- 徐钦峰, 刘 琼, 叶 青 等. 基于光纤器件的超短脉冲自相关仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1607~1612
- 14 F. Salin, P. Georges, G. Roger *et al.*. Single-shot measurement of a 52-fs pulse[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21): 4528~4531
- 15 Sun Zhihong, Xia Yanwen, Liu Hua. Picosecond pulse duration measurement using non-collinear single-shot autocorrelator[J]. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(8): 876~879
- 孙志红, 夏彦文, 刘 华. 单发次皮秒脉冲宽度的二阶自相关法测试[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(8): 876~879
- 16 Wang Xingtao, Yin Dingjun, Shuai Bin *et al.*. Measure ultrashort pulsewidth with total reflection second-order autocorrelator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- 王兴涛, 印定军, 帅 斌 等. 应用全反射二阶自相关仪测量超短脉冲脉宽[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1018~1020
- 17 Zhang Fuling, Ouyang Xiaoping, Xie Xinglong *et al.*. Contrast measurement of ultrashort laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1171~1174
- 张福领, 欧阳小平, 谢兴龙 等. 超短激光脉冲对比度的三阶相关测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1171~1174
- 18 Dongfang Zhang, Liejia Qian, Peng Yuan *et al.*. Fiber-array-based detection scheme for single-shot pulse contrast characterization[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1969~1971
- 19 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

20 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

21 I. O. Musgrave, C. Hernandez-Gomez, D. Canny et al..

Minimization of the impact of a broad bandwidth high-gain nonlinear preamplifier to the amplified spontaneous emission pedestal of the Vulcan petawatt laser facility[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(28): 6978~6983

栏目编辑:宋梅梅

## 7 kW 级光纤耦合输出全固态激光器

全固态激光器具有效率高、寿命长、光束质量好、体积适中、可柔性传输等优点,是目前较成熟的激光技术之一。近年来,随着激光加工技术迅速发展,数控技术日趋完善,激光加工装备已广泛应用于先进制造业,但所使用的核心部件高功率全固态激光器几乎全部依赖于进口,这在一定程度上制约了大功率激光加工装备的普及,阻碍了我国制造业的发展。

本实验采用自主研发的千瓦级半导体激光侧面抽运模块,利用三级谐振加五级串联放大技术实现了 7 kW 以上稳定激光输出。在万级超净车间环境下,将激光器放置于光学平台上,经准直后将激光射入 Ophir 公司万瓦级激光功率探头,通过专家测试,该激光器连续运转 8 h 的平均输出功率为 7.13 kW,不稳定性优于  $\pm 0.98\%$  (如图 1 所示),电光效率为 18.4%,光束质量为 50.3 mm·mrad。利用自行设计的光束整形系统,将上述激光光斑准直为合适大小,选用 Optoskand 公司配套的光学器件耦合进数值孔径 0.22,芯径 1 mm 的水冷光纤,最高出纤功率为 6.82 kW,耦合效率优于 96% (如图 2 所示),其中  $P_{in}$  为入纤功率, $P_{out}$  为出纤功率。基于该激光器的加工装备可应用于激光焊接、表面淬火和激光熔覆等,填补了我国工业用高功率激光器的空白,有助于打破国外垄断,降低相关产品价格,加速我国制造

业的发展。

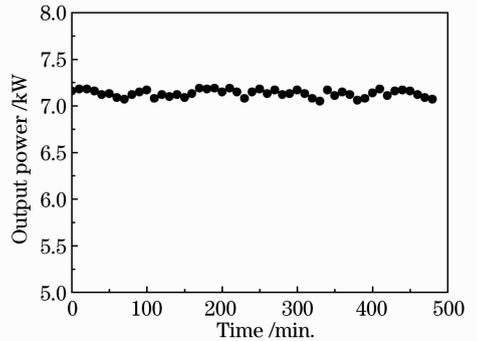


图 1 7 kW 全固态激光器功率稳定性曲线  
Fig. 1 Output power stability curve of 7 kW solid-state laser

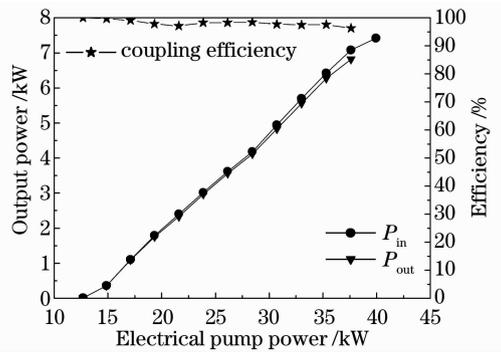


图 2 7 kW 全固态激光器输出功率及光纤耦合效率  
Fig. 2 Output power and coupling efficiency of 7 kW solid-state laser

王奕博 王宝华 张志研 叶家宝 杨海波 刘燕楠 侯玮 李晋闽 林学春

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

\* E-mail: xclin@semi.ac.cn

收稿日期: 2012-10-11; 收到修改稿日期: 2012-11-27