

基于亚皮秒紫外激光器的诊断设备标定平台

袁 铮¹, 邓克立¹, 李 晋¹, 杨志文¹, 吴冰静², 陈 韬¹, 邓 博¹, 齐文博², 王强强¹,
曹柱荣¹, 刘慎业¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 为充分利用亚皮秒紫外激光器的大能量、超短脉宽的紫外激光输出特性, 配套建立了激光惯性约束聚变(ICF)诊断设备性能指标的标定平台。标定平台具备激光能量测量、光传输延迟、光束分割与等比递减、序列光脉冲产生器等功能, 可为相关诊断设备提供结构支撑和高真空度的运行环境。通过机械与光学设计完成了平台各部件的研制, 并利用该平台对 X 射线二极管的响应时间、X 光条纹相机的扫速、X 射线分幅相机的动态范围等指标进行了标定。结果表明, 该标定平台与亚皮秒紫外标定源的匹配度良好, 可实现多种诊断设备性能指标的精密标定。

关键词 激光器; 亚皮秒紫外激光器; 标定平台; 诊断设备; 动态范围; 扫描速度

中图分类号 O434 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0614002

Diagnostic Equipment Calibration Platform Based on Sub-Picosecond Ultraviolet Laser

Yuan Zheng¹, Deng Keli¹, Li Jin¹, Yang Zhiwen¹, Wu Bingjing², Chen Tao¹, Deng Bo¹,
Qi Wenbo², Wang Qiangqiang¹, Cao Zhurong¹, Liu Shenye¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract In order to make full use of output characteristics of high energy, ultrashort pulse width of sub-picosecond ultraviolet lasers, a calibration platform of laser inertial confinement fusion(ICF) diagnostic equipment is established. The calibration platform has such functions as laser energy measurement, optical transmission delay, beam splitting and geometric decline, and sequential optical pulse generator, which can provide the structural support and high vacuum operating environment for the relevant diagnostic equipment. The mechanical and optical design is developed in all parts of the platform, and the platform is used to calibrate the X-ray diode response time, X-ray streak camera sweep speed, X-ray framing camera dynamic range and so on. The results show that the calibration platform matches the sub-picosecond ultraviolet calibration source well, and can achieve precise calibration of various diagnostic equipments.

Key words lasers; sub-picosecond ultraviolet laser; calibration platform; diagnostic equipment; dynamic range; sweep speed

OCIS codes 140.7090; 150.1488; 340.7440

1 引 言

激光惯性约束聚变(ICF)实验中观测对象的时间尺度通常为百皮秒至几纳秒, 如内爆芯部自发光时间约为 200 ps^[1], 黑腔中等离子体膨胀的移动时间约为 1 ns^[2]。随着激光能量的提高和打靶装置的升级^[3-4], 诊断设备的性能指标也迅速提升。如 X 射线分幅相机和条纹相机的时间分辨率都已突破 10 ps^[5-7]。鉴于

收稿日期: 2016-12-23; 收到修改稿日期: 2017-02-16

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014B0102010)

作者简介: 袁 铮(1984—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事 X 射线时空诊断技术方面的研究。

E-mail: yuanzh8406@126.com

目前对诊断精密化程度的要求越来越高,这些诊断设备时间分辨率的精密标定成为亟需解决的问题。

为了精密标定诊断设备的时间分辨率,建立了高功率亚皮秒紫外标定源。该激光器的可输出激光波长为248.5 nm,脉宽约为0.5 ps,能量约为100 mJ,光斑大小为35 mm×25 mm^[8]。由于248.5 nm紫外激光空气电离阈值功率密度约为 10^9 W/cm²^[9-10],而该激光器的瞬时输出功率密度为 2.3×10^{10} W/cm²,因此该激光暴露于大气中将引起部分空气电离从而影响激光器性能。同时,为了充分发挥该亚皮秒紫外标定源的性能优势,需要建立配套的标定平台,以衔接完成诊断设备各项参数指标的精密标定工作。

标定平台包括处于低真空腔中的光学延迟与同步组件、光学精密标准具、光束分割与等比递减模块、高真空腔系统等部分。可实现的功能:为诊断设备提供可调电子学延迟和大于30 ns光学延迟;为诊断设备提供结构支撑和 3.0×10^{-3} Pa的高真空环境;为X光条纹相机和光学条纹相机提供序列脉冲信号,进行扫速标定;对激光光束在空间上进行分割产生强度等比递减的子光束,用于标定分幅相机的动态范围。

2 标定平台设计

2.1 标定平台总体构成

由于激光器自身提供的触发信号相对于激光信号的时间提前量(约30 ns)不能满足多种诊断设备的触发延迟(约50 ns)要求,故需设计光学延迟与同步组件,使激光信号无展宽、无损耗地延迟30 ns。对于大部分ICF实验诊断设备,如X射线二极管(XRD)、X光条纹相机、X射线分幅相机等,其正常工作时均需要加高电压,且须处于高真空环境中,因此,在标定平台中设计了高真空腔系统为各种诊断设备提供高真空环境。对于条纹相机及X射线分幅相机等核心诊断设备,特别配置了光学精密标准具以标定光学条纹相机和X光条纹相机的扫速和扫描非线性等指标;配置了光束分割与等比递减组件以标定X射线分幅相机的动态范围。由于该高功率亚皮秒紫外激光器的瞬时输出功率密度可达 2.3×10^{10} W/cm²,大于其电离阈值,若在大气中长距离传输将引起部分空气电离,从而影响激光能量、脉宽等性能参数,因此,在设计时要求前端激光传输光路全部处于低真空腔室中。平台整体结构如图1所示。由于激光器的激光输出呈45°角,因此在平台激光入口处设置了光束调节镜组以便于低真空腔内的光路折转设计。

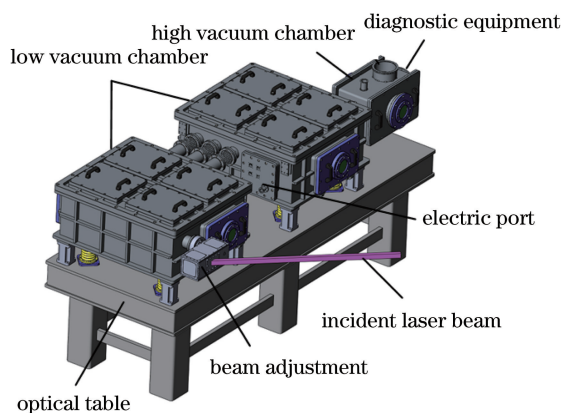


图1 标定平台整体结构

Fig. 1 Scheme of the calibration platform

2.2 光路设计

考虑到部分诊断设备的触发延迟时间较短(约30 ns),同时标定某些技术指标时不需要光学精密标准具和光束分割与等比递减模块等部件,为了实现平台的高兼容性,整个光路设计4条具有不同延时量的光束输出通道,分别为通道A、B、C和D。其中,通道A为光束经过总长度10 m的延迟光路进入光束分割与等比递减模块后再进入高真空腔照射到后端探测器上;通道B为光束经过总长度10 m的延迟光路后直接进入高真空腔照射到后端探测器上;通道C为光束从激光器输出后经反射镜进入光束分割与等比递减模块后再进入高真空腔照射到后端探测器上;通道D为光束从激光器输出后经反射镜直接进入高真空腔照射到后端探测器上。

为了降低能量传输损耗和减少激光脉冲展宽,采用尽可能少的反射镜形成折叠光路,同时采用高精度一维电动平移台切换反射镜和分束镜,实现 4 种不同光束输出通道的切换,产生不同的时间延迟。图 2 为通道 A 的光路排布图,图中镜组 M_{11} 、 M_7 、 M_9 、分束镜(BS)为一维可调镜组,通过这 4 个镜子的切入与切出实现 4 个光束通道之间的转换。其中,光学精密标准具、光束分割与等比递减模块使用的前端光路完全相同,只需根据标定需要将标准具或光束分割与等比递减模块移入光路中。

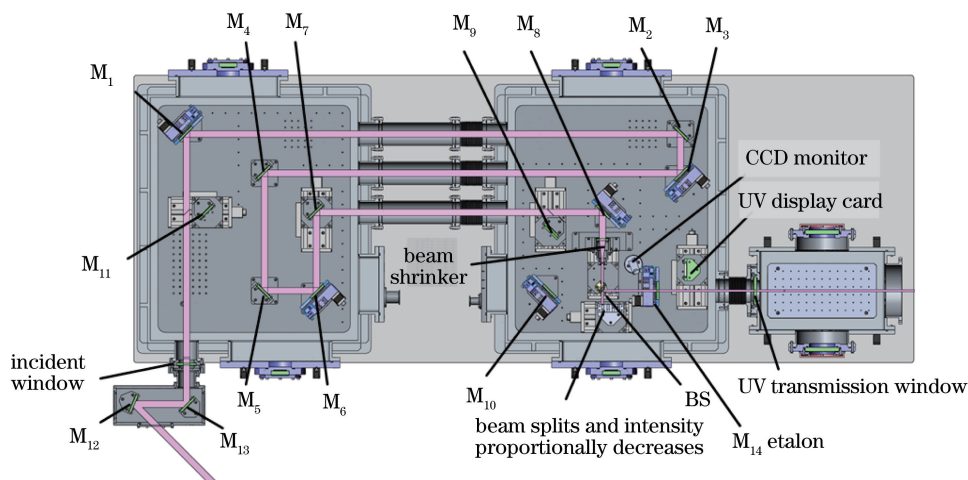


图 2 光束通道 A 的光路排布图

Fig. 2 Beam path layout of channel A

2.3 光束分割与等比递减模块

为了标定分幅相机的动态范围,特别设计了光束分割与等比递减模块。采用在同一反射面镀不同反射率膜层的方法将激光束分割成等间距、等尺寸的 6 等份,并约定第一个反射面反射率约为 95%,其后每个反射面的反射率按约 40% 递减,形成强度按比例衰减的序列子光束,用于标定分幅相机的动态范围。光束分割与等比递减模块的结构如图 3 所示。

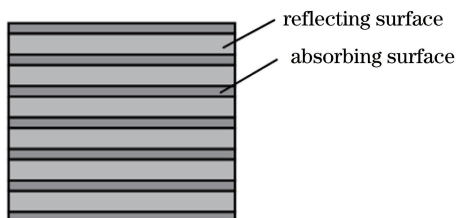


图 3 光束分割与等比递减模块示意图

Fig. 3 Schematic of beam split and intensity proportional attenuation module

3 标定平台能量损耗测量

平台光路复杂,激光通过的元件较多,因此需要对激光经过光路后的能量损耗进行检测。采用 2 个型号相同、标定系数相近的激光能量计分别在平台入光口和高真空腔室出光口对激光能量进行测量。以 2 个能量计读数的比值为统计数据,共 30 组,如图 4 所示,激光经过 12 个反射镜、2 个玻璃窗口后的能量损耗平均值为 15.5%。

4 典型诊断设备性能参数标定实验

4.1 XRD 上升时间的标定

利用光学延迟与同步组件,激光器输出的激光束经 30 ns 的延迟光路后,照射到高真空腔室后端法兰所接的 XRD 探测器的灵敏面上。在激光器前端光路中分出一束激光通过高压光电管产生幅值为 15~20 V、

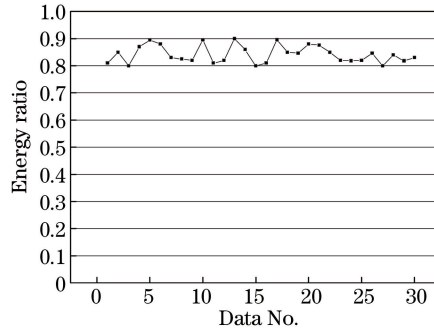


图 4 能量损耗测量结果

Fig. 4 Energy loss measurement

脉宽约为 0.8 ns 的脉冲作为 XRD 的触发信号,当延迟后的光束照射到 XRD 探测器的灵敏面上,即可在示波器上获得 XRD 的测量信号波形,上升沿的 10%~90%即为 XRD 的上升时间。典型标定照片如图 5 所示。XRD 的结构及其工作原理决定了 XRD 的上升时间与 XRD 器件本身的光、电性能有关。XRD 上升时间标定结果的不确定度主要来自于示波器的读数误差,标定时采用重复测量的方法,测量结果的平均值即为其上升时间,对应的不确定度用标准偏差公式计算,即

$$s(d_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}, \quad (1)$$

式中 n 为重复测量次数, d_i 为第 i 次测量值, \bar{d} 为 n 次测量的平均值。

在相同实验条件下,将激光器触发 10 次,获得 XRD 上升时间的 10 次测量结果,其平均值为 62.5 ps,测量不确定度为 0.4 ps。

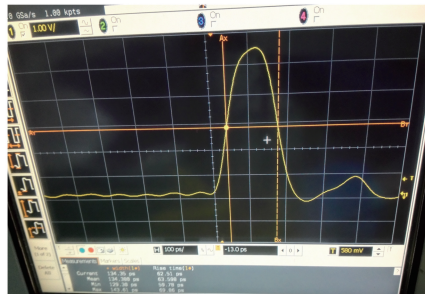


图 5 XRD 上升时间标定照片

Fig. 5 Calibration picture of XRD rise time

4.2 X 光条纹相机扫速标定

采用光束通道 A,将光束分割与等比递减模块移出光路,激光通过光学延迟与同步组件延迟 30 ns 后,正入射到响应波长为 248.5 nm、反射率为 70%的法布里-珀罗标准具,标准具产生相同空间位置、等时间间隔、强度递减的序列光脉冲后进入高真空腔室,照射到待标定条纹相机的光阴极。条纹相机工作模式为 2 ns 扫速档,其扫描电脉冲信号根据激光延迟时间设定触发延迟后,将获得等时间间隔的扫描条纹图像。扫描速度可表示为^[11]

$$v = \frac{\Delta p}{2d/c}, \quad (2)$$

式中 v 表示扫描速度, Δp 表示扫描条纹峰峰值之间的距离, d 为标准具的长度, c 为光速。

扫速的不确定度表示为

$$u_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial d}\right)^2 u_e^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \Delta p}\right)^2 u_{\Delta p}^2}, \quad (3)$$

式中 u_e 为标准具光程的不确定度,由测量标准具厚度的器件的精度给出; $u_{\Delta p}$ 为数据处理过程中引入的不确

定度,由软件处理直接给出。

标准具所用石英材料的折射率为 1.4584,标准具厚度为 10.285 mm,故标准具产生的序列脉冲的时间间隔为 100 ps。典型扫速标定结果如图 6 所示,故条纹相机的扫速为 0.83 pixel/ps,扫速的不确定度约为 1.6%。

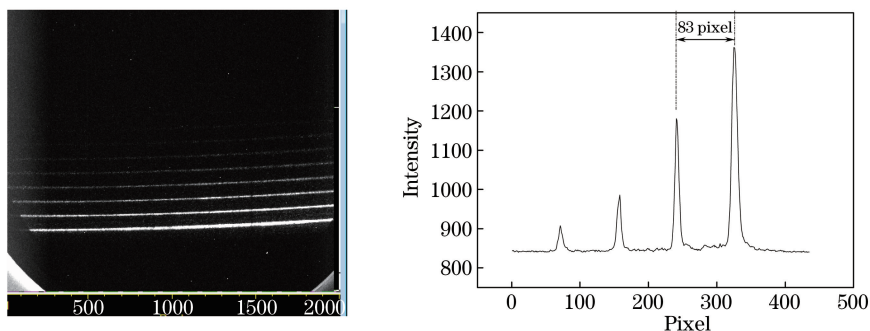


图 6 X 光条纹相机扫速标定结果

Fig. 6 Sweep speed calibration of X-ray streak camera

4.3 分幅相机动态范围的标定

光束分割与等比递减模块对延迟 30 ns 后的激光束进行反射并分割后,可形成一系列光强依次递减 40% 的子光束,照射到分幅相机微带线阴极上,分幅相机静态成像后将得到大小相同、间距相等的多个光斑。图 7 为典型的光斑强度分布曲线图,由图可知各光斑最大强度比为 $I_2/I_1 = 47\%$, $I_3/I_2 = 37\%$, $I_4/I_3 = 40\%$, $I_5/I_4 = 34\%$ 。

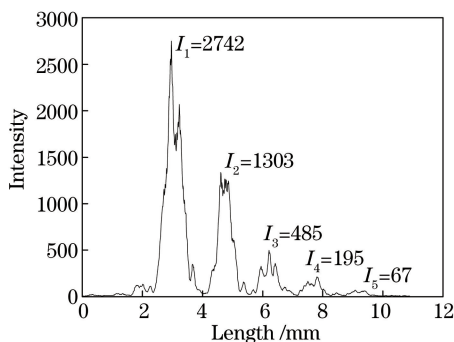


图 7 光斑强度分布图

Fig. 7 Spot intensity distribution

通过分束镜将标定平台入口处的激光分为两路,一路用于监测激光能量,一路用于动态范围测试。通过调整激光器的输出能量,可获得不同激光能量下的一系列光强分布图。设置激光器工作于单次触发模式,发次 1 激光能量为 8 mJ 时得到分幅相机静态图像,如图 8(a)所示,其最弱光斑的强度计数值为 67,最强光斑的强度计数值 $I_{\max 1} = 2742$;发次 2 激光能量为 30 mJ 时得到分幅相机静态图像,如图 8(b)所示,其最弱光斑的强度计数值为 205,最强光斑的强度计数值 $I_{\max 2} = 8801$ 。发次 1 和发次 2 的激光光路与相机状态相同,若

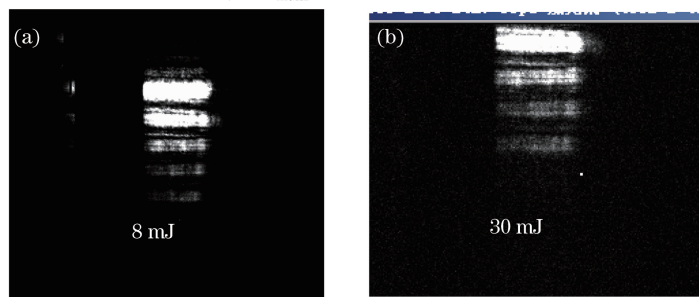


图 8 不同激光能量下分幅相机静态图像

Fig. 8 Static images of framing camera at different laser energy

两次实验均在分幅相机的线性响应范围内,则最强光斑的强度计数比值应与两发次的激光能量比值相同。但 $I_{\max 2}/I_{\max 1}=3.2$, 小于激光能量的比值 3.75, 故认为计数值为 8801 的光斑为分幅相机线性范围内能测量的最强光斑。同样地, 对于发次 1 和发次 2 的最小值, 由于强度比值小于激光能量的比值, 因此认为计数值为 67 的光斑为分幅相机线性范围内能测量的最弱光斑。最强光斑与最弱光斑的强度比值为 131, 故分幅相机的动态范围为 131。

采用分光光度计测量得到光束分割与等比递减模块在 248.5 nm 波长处各表面反射率分别为 $E_1=0.95, E_2=0.38, E_3=0.15, E_4=0.06, E_5=0.024, E_6=0.009$ 。由于标定得到的各光斑最大强度比与光束分割与等比递减模块的各表面反射率比值偏差达 17.5%, 故认为分幅相机动态范围标定的误差大于 17.5%。通过增加光束分割与等比递减镜组的反射面数目, 可提高分幅相机动态范围的标定精度。增大反射面的反射率衰减比例, 可在同一发次中实现分幅相机动态范围的标定。

5 结 论

为了充分利用和扩展高功率亚皮秒紫外激光器的应用, 建立了与之配套的诊断设备标定平台。介绍了平台总体构成及其光学设计思路, 并基于该平台的光学延迟与同步组件对高性能 X 射线二极管的上升时间进行了精密标定, 利用光学延迟与同步组件配合光学精密标准具对 X 光条纹相机的扫速进行了精密标定。同时基于平台的光束分割与等比递减模块, 利用光学元件对标定源的等比衰减实现了分幅相机动态范围的实验标定。为了提高分幅相机动态范围标定的效率和精确度, 通过增加光束分割与等比递减镜组的反射面数目, 或增大反射面的反射率衰减比例, 可在同一发次中实现分幅相机动态范围的标定。

参 考 文 献

- [1] Pu Y, Huang T, Lei H, *et al.* Direct-drive cryogenic-target implosion experiments on SGII prototype laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(4): 042704.
- [2] Zhang L, Ding Y, Jiang S, *et al.* Reducing wall plasma expansion with gold foam irradiated by laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(11): 110703.
- [3] Zhang Bo, Peng Zhitao, Lü Jiakun, *et al.* Multi-beams time-synchronization measurement for inertial confinement fusion laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0208003.
张 波, 彭志涛, 吕嘉坤, 等. 惯性约束核聚变激光驱动器多路光束时间同步测试方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0208003.
- [4] Cheng Ningbo, Li Fuquan, Feng Bin, *et al.* Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波, 李富全, 冯 斌, 等. ICF 激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202005.
- [5] Opachich Y P, Kalantar D H, MacPhee A G, *et al.* High performance imaging streak camera for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(12): 125105.
- [6] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E116.
- [7] Wei Huiyue, Xu Tao, Wang Feng, *et al.* Designment of a novel optical streak camera with ultrahigh temporal resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0823003.
魏慧月, 徐 涛, 王 峰, 等. 一种新型高时间分辨的光扫描装置设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0823003.
- [8] Deng Keli, Chen Tao, Wang Qiangqiang, *et al.* High power sub-picosecond ultraviolet calibration facility and its preliminary application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0614004.
邓克立, 陈 韬, 王强强, 等. 高功率亚皮秒紫外标定源装置及其初步应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0614004.
- [9] Chen Dezhong, Gao Jianbo, Ye Jingfeng, *et al.* Experiment study of air ionization and plasma channel conducting with nanosecond ultraviolet laser pulses[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 262-264.
陈德章, 高建波, 叶景峰, 等. 纳秒紫外激光空气电离及等离子体导电实验研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(3): 262-264.
- [10] Wang Xiaolei, Zhang Nan, Zhao Youbo, *et al.* Determination of air ionization threshold with femtosecond laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(1): 354-357.
王晓雷, 张 楠, 赵友博, 等. 飞秒激光激发空气电离的阈值研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(1): 354-357.
- [11] Zhu T, Yang J M, Deng B, *et al.* Note: X-ray streak camera sweep speed calibration[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(5): 056108.