

高功率亚皮秒紫外标定源装置及其初步应用

邓克立 陈 韬 王强强 曹柱荣*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 基于气体染料激光器的均匀光斑输出特性,建立了一套亚皮秒紫外标定装置。该系统可以产生波长为 248.5 nm,脉宽约为 0.5 ps,总能量约为 100 mJ,大小约为 35 mm×25 mm 的均匀光斑。利用该系统成功实现了高时间分辨惯性约束聚变诊断系统的初步标定。结果表明,新建立的亚皮秒紫外标定装置可以满足皮秒系统的精密标定需求,并且利用系统稳定的能量输出特点,有望发展定量化的时间分辨定标技术。

关键词 激光器;亚皮秒紫外标定源;染料激光器;分幅相机;曝光时间

中图分类号 O434 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0614004

High Power Sub-Picosecond Ultraviolet Calibration Facility and Its Preliminary Application

Deng Keli Chen Tao Wang Qiangqiang Cao Zhurong

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

Abstract A sub-picosecond ultraviolet calibration facility is established based on the uniform profile of a gas dye laser, and this is specially designed for the inertial confinement fusion diagnosis system calibration. The laser beam operates at 248.5 nm with a pulse width of about 0.5 ps and a total energy of about 100 mJ, and generates a uniform spot that is about 35 mm×25 mm. Some preliminary calibration results of a high temporal resolution diagnosis system are obtained on the facility, which proves that the parameters of picosecond systems can be calibrated on the facility. Since the energy output is stable, it is possible to develop a quantitative time-resolving calibration technique.

Key words lasers; sub-picosecond ultraviolet calibration source; dye laser; framing camera; exposure time

OCIS codes 140.7240; 150.1488; 340.7480

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)实验中,观测对象的时间尺度通常为 100~5000 ps,如内爆芯部自发光时间约为 200 ps^[1],黑腔中等离子体膨胀移动时间约为 1 ns^[2],输运管中热波运动时间约为 4 ns。随着 ICF 实验的进展,各类时间诊断设备的时间分辨率越来越高^[3-4],如 X 光条纹相机时间分辨率小于 10 ps^[5],X 光门控分幅相机时间分辨率小于 100 ps^[6]。而以往的标定源,如 8 ps 紫外激光器、打靶烧蚀产生的 X 光源,脉宽均在 10 ps 量级,已经很难作为皮秒系统时间特性的精密标定源。此外,在许多标定实验中,常需要一个均匀光源的直接辐照来实现均匀的空间标定。为了满足性能不断提升的各类诊断设备的标定需求,建立了一套高功率亚皮秒紫外激光系统。该激光器的输出激光波长为 248.5 nm,脉宽约为 0.5 ps,总能量约为 100 mJ,光斑大小约为 35 mm×25 mm,占 80% 的中间区域光斑不均匀性在长轴方向低于 10%。

X 光门控分幅相机具有较好的时间分辨与二维空间分辨特性,所以广泛应用于惯性约束聚变实验的诊断。分幅相机的曝光时间是最受关注的指标之一,主要受选通脉冲的脉宽、幅值、形状以及微通道板几何结

收稿日期: 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-03-03

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金(2015B0102016)

作者简介: 邓克立(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事 X 光时空诊断技术方面的研究。

E-mail: cryingfist2013@163.com

* **通信联系人.** E-mail: cao33jin@aliyun.com

构、材料特性的影响^[7]。目前主要有两种方法进行曝光时间的测量。第一种方法是利用超短脉冲(小于 10 ps)光源直接辐照微带,通过测定微带亮斑长度与选通脉冲通过微带的波速,得出曝光时间^[8]。这种方法要求光源在紫外波段中光斑的大小能够覆盖大部分微带,且光斑空间均匀性不能太差。第二种方法是利用超短脉冲激光,通过长度等差排列的光纤形成相同时间间隔的激光点阵列,将该阵列成像到微带上,通过分析图像记录的激光点数量与激光点时间间隔得出曝光时间^[9]。这种方法降低了对激光光斑质量的要求,但由于激光点离散排列,增加了测量的不确定性。

本文利用高功率亚皮秒紫外激光系统的均匀光源作为标定源,采用直接辐照分幅相机微带的方法,开展了气室型分幅相机曝光时间的标定。

2 实验方法

高功率亚皮秒紫外激光系统主要由 XeCl 准分子激光器、亚皮秒染料激光器系统、KrF 放大器组成;亚皮秒染料激光器系统主要由淬灭腔染料激光器(QCDL)、超短腔染料激光器(SCDL)、门控饱和吸收激光器(GSA)、分布反馈式染料激光器(DFDL)4 个染料激光器及 AMP1、AMP2、AMP3、Bethune Cell 4 个染料放大器组成。如图 1 所示,XeCl 准分子激光器作为亚皮秒染料激光器系统中 QCDL 和各级放大器的抽运光,亚皮秒染料激光器系统输出脉宽约为 0.5 ps、能量约为 150 uJ、波长为 496 nm 的激光,通过偏硼酸钡(BBO)晶体倍频为 248.5 nm 的激光,进入 KrF 放大器及空间滤波器,最终得到能量约为 100 mJ 的均匀大光斑。图 2 为紫外自相关仪测试得到的半峰全宽(FWHM)结果。假定激光波形为高斯脉冲,自相关函数的脉宽为激光波形脉宽的 $\sqrt{2}$ 倍^[10],故激光脉宽约为 460 fs。

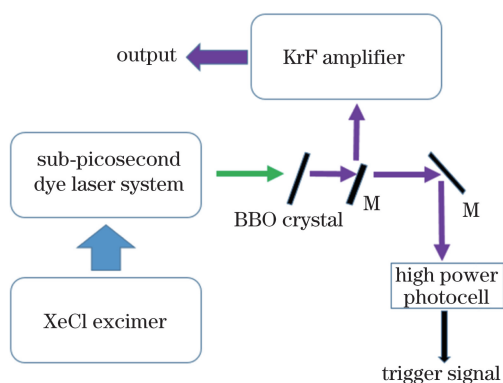


图 1 高功率亚皮秒紫外激光系统结构

Fig. 1 Scheme of high power sub-picosecond ultraviolet laser system

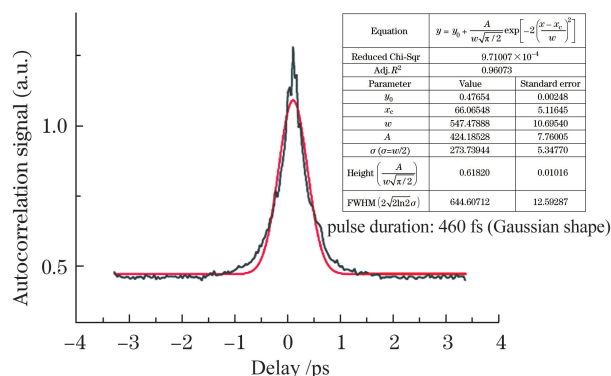


图 2 输出激光半峰全宽测试结果

Fig. 2 FWHM of output laser

首先测定激光系统输出光斑的均匀性。在近场将激光衰减、聚焦后,由 CCD 记录光斑形貌。如图 3 所示,剔除记录图片不清晰的边缘部分,选出中间 80% 的区域,定义非均匀性为计数在长轴上投影积分的标准差占平均值的百分比。记录如表 1 所示,可以看出光斑中心区域长轴方向的非均匀性小于 10%,可以近似为均匀照明源,符合实验要求。利用能量计(NOVAII/PE50BF-C, Ophir Photonics, 以色列)在激光器输出口测量激光能量,结果如表 2 所示,可以发现能量涨落幅度仅为 0.8%,输出能量很稳定,有望发展量化的时间分辨定标技术。

表 1 光斑非均匀性

Table 1 Spot non-uniformity

Shot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Non-uniformity /%	8.58	8.28	8.31	8.28	8.31	8.21	8.45	8.84	8.88	8.65

表 2 激光能量

Table 2 Laser energy

Shot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energy /mJ	105.8	108.3	106.0	106.2	105.9	106.1	107.1	105.4	106.5	107.2

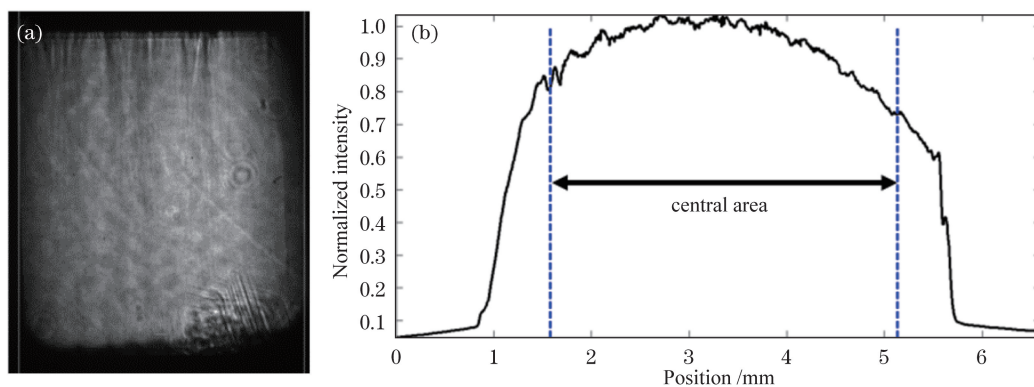


图 3 发次 5 光斑形貌。(a)原始数据;(b)归一化光强

Fig. 3 Profile of shot 5. (a) Raw data; (b) normalized intensity

如图 1 所示,为了保证提供给相机的触发信号与主激光之间的晃动很小,在亚皮秒染料激光器系统的激光经 BBO 晶体倍频后进入 KrF 放大器之前,分出一束激光通过一个高压光电管产生幅值为 15~20 V、脉宽约为 0.8 ns 的脉冲作为触发信号。

分幅相机每条微带的时间记录范围只有 200 ps,为了捕捉亚皮秒信号,需要将 4 条微带在时间上首尾相连,不留空隙;考虑到选通脉冲的触发晃动为几十皮秒量级,整个时间记录窗口不超过 800 ps,极短的时间记录窗口对同步性提出了很高的要求。如图 4 所示,标定实验前在微带位置放置一个快响应光电探头,该器件与高压光电管产生的触发信号通过同样的 2 m 线缆连接至示波器(OSC),可通过示波器准确地测出辐照微带的主激光信号与触发之间的延迟。通过调节触发信号连接相机的延迟线缆长度,准确地同步选通脉冲与主激光信号。

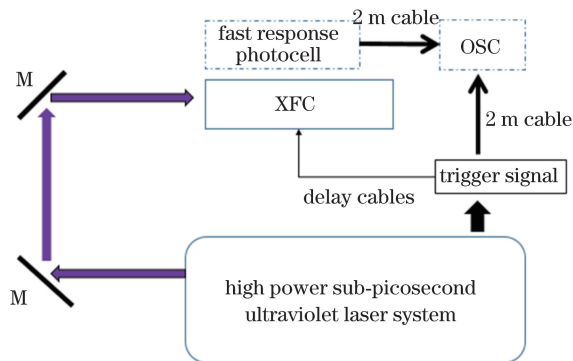


图 4 实验布局

Fig. 4 Experiment layout

3 实验结果

实验中 4 路选通脉冲通过微带左端加载,不同的直流偏压通过微带右端加载。设曝光时间为 T ,实验获得的曝光增益曲线 FWHM 为 N pixel, CCD 单元像素的尺寸为 S ,则曝光时间表达式为

$$T = NS/V_p, \quad (1)$$

式中 V_p 为选通脉冲在微带线上的传输速度。

为了与选通脉冲电路的 50Ω 输出阻抗以及 50Ω 终端负载匹配,微带线两端通过渐变线进行阻抗匹配,所以在节点处有明显的反射点,由此可以通过时域反射仪(TDR)精密测量 V_p 。经过多次测量, V_p 平均值为 167 mm/ns。实验所用光纤锥 CCD 光纤比为 1:1, CCD 为 SI1000,且模式设置为 2048 pixel×2048 pixel,像素大小为 18 μm ,则在沿脉冲传输方向的微带线上单位像素对应的的时间尺度为 0.108 ps(取三位有效数字)。将实验获得的微带动态曝光图像进行一维平均后读取 FWHM,即可求出曝光时间。如图 5 所示,第 4 条微带的直流偏压为 0,将第 4 条微带的强度分布在 x 轴方向取平均值后得到的曲线即为曝光增益曲线,采用高

斯曲线拟合后求出其 FWHM 为 626 pixel, 则其对应的曝光时间为 67.6 ps。

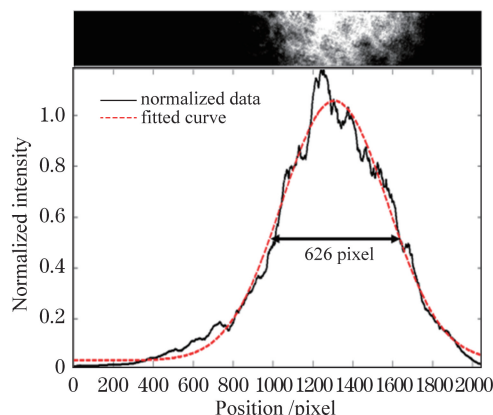


图 5 第 12 发第 4 条微带的归一化曝光增益曲线

Fig. 5 Normalized exposure gain curves of the 4th microstrip for the shot 12

4 结 论

高功率亚皮秒紫外标定源装置能够提供一个均匀稳定的亚皮秒紫外光源, 通过在光路中设置高压快响应光电管获得可靠稳定的触发信号, 实现主激光与选通脉冲的精密同步。成功标定了 X 光门控分幅相机的曝光时间, 满足皮秒级时间分辨诊断设备的标定需求。利用其能量波动小的特点, 有望开展定量化标定技术的研究, 并利用该光源高功率、亚皮秒量级的特点, 也可进行紫外波段非线性光学的研究。

参 考 文 献

- 1 Pu Y D, Huang T X, Lei H L, *et al.*. Direct-drive cryogenic-target implosion experiments on SGIII prototype laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(4): 042704.
- 2 Zhang L, Ding Y K, Jiang S E, *et al.*. Reducing wall plasma expansion with gold foam irradiated by laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(11): 110703.
- 3 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Tang Daorun, *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112006.
彭晓世, 王 峰, 唐道润, 等. 聚变反应历程测量系统研制及应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112006.
- 4 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.
- 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 Bradley D K, Bell P M, Landen O L, *et al.*. Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 716-718.
- 7 Yang Wenzheng, Hou Xun, Bai Yonglin, *et al.*. Uniform design method of the exposure time of X-ray picoseconds framing camera with gated microchannel plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(3): 439-443.
杨文正, 侯 洵, 白永林, 等. 微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机曝光时间的均匀设计[J]. *光子学报*, 2008, 37(3): 439-443.
- 8 Yi Rongqing, He Xiaolan, Li Hang, *et al.*. Time response characteristics of X-ray detector on Silex-I laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3111-3114.
易荣清, 何小安, 黎 航, 等. Silex-I 飞秒激光装置 X 射线探测系统时间特性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3111-3114.
- 9 Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.*. Large-format microchannel plate gated framing camera[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 677: 14-17.
- 10 Mashiko H, Suda A, Midorikawa K. All-reflective interferometric autocorrelator for the measurement of ultra-short optical pulses[J]. *Applied Physics B*, 2003, 76(5): 525-530.