

# 脉冲展宽 X 射线光电二极管的研究

付文勇<sup>1,2</sup>, 蔡厚智<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>, 雷云飞<sup>1</sup>, 黄峻堃<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 邓珀昆<sup>1</sup>, 龙井华<sup>1\*</sup>, 刘进元<sup>1</sup>

<sup>1</sup>深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup>南阳理工学院计算机与信息工程学院, 河南 南阳 473500

**摘要** 研制了一种脉冲展宽型 X 射线光电二极管, 并利用飞秒激光进行了验证。在光电阴极加载随时间变化的斜坡脉冲, 使阴极与栅网之间产生一个随时间变化的电场, 变化的电场赋予光电子轴向的速度色散, 使较早产生的电子的移动速度快于较晚出现的电子。光电子进入漂移区, 在到达微通道板(MCP)前被展宽, 放大后的信号由示波器读出。应用脉冲展宽技术后, 探测器的响应时间可提高约 11 倍。

**关键词** 超快激光; X 光电二极管; 脉冲展宽技术; 时间分辨; 透射式阴极; 展宽倍率

中图分类号 TN143; O536

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1032001

## Study on Pulse-Dilation X-Ray Diodes

Fu Wenyong<sup>1,2</sup>, Cai Houzhi<sup>1</sup>, Wang Dong<sup>1</sup>, Lei Yunfei<sup>1</sup>, Huang Junkun<sup>1</sup>,

Wang Yong<sup>1</sup>, Deng Pokun<sup>1</sup>, Long Jinghua<sup>1\*</sup>, Liu Jinyuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

<sup>2</sup>College of Computer and Information Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473500, China

**Abstract** A pulse-dilation X-ray diodes (XRD) is developed and also tested using a femtosecond laser. A time-dependent ramp waveform is applied to a photocathode (PC) to introduce a time-dependent electric field between PC and mesh. This electric field leads to an axial speed dispersion of the photoelectron signal. The electrons generated earlier move faster than those later. The photoelectrons transiting a drift region are stretched before reaching a microchannel plate (MCP), and are then amplified and read out with a digital oscilloscope. The detector's time response is enhanced by 11 times with the usage of pulse-dilation technique.

**Key words** ultrafast optics; X-ray diode; pulse dilation technique; temporal resolution; transmission cathode; dilation ratio

**OCIS codes** 320.7080; 230.0250; 040.5160

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)常用于寻找新能源, 目前多个国家都开展了这方面的研究。在激光聚变研究中, 辐射流存在于包括黑腔物理的 X 光辐射流、内爆物理的靶丸自发光等物理过程中。为了研究黑腔辐射源的强度、辐射温度, 以及内爆辐照对称性与热核燃烧过程等, 辐射流的测量不可或缺<sup>[1-2]</sup>。目前辐射流测量设备的探测部件主要为真空脉冲展宽型 X 射线光电二极管(XRD)<sup>[3-5]</sup>。快速真空 XRD 有两种类型: 一种是使用反射型光电阴极(PC), 另一种

使用透射型光电阴极<sup>[6-8]</sup>。

内爆燃烧时间宽度通常为 150 ps, 且随着性能的提高该时间变短<sup>[9]</sup>。虽然可以用传统的光电探测器记录这些来自内爆等离子体的光信号, 但时间分辨率限制在 100 ps 左右<sup>[10]</sup>。由于燃烧持续时间短, 因此在 ICF 反应过程中研究等离子体的详细变化具有挑战性, 这就使得提高检测器的时间分辨率以完全表征 ICF 燃烧过程显得尤为重要。提高探测信号时间分辨率主要有两种途径: 一是提高探测设备自身的时间分辨率; 二是通过脉冲展宽技术在空间上展宽被探测信号以提高设备的时间分辨率。目

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2020-01-07; 录用日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515011474)、深圳市科技计划项目(JCYJ20180305125443569)

\* E-mail: jhlong@szu.edu.cn

前,反射式 XRD 没有对光电子进行后续处理的空间,无法与脉冲展宽技术结合,而透射式 XRD 与脉冲展宽技术结合,具备对光电子进行后续处理的能力,为提高探测器时间分辨率提供了条件。脉冲展宽技术是一种利用真空漂移管对电子的速度色散来减慢电子信号的方法。Prosser<sup>[11]</sup>提出了一种通过赋予电子束速度色散来增加电子探测器带宽的技术。该技术可将短暂的信号转换为较长的时间刻度以减慢被探测信号,从而提高设备的时间分辨率<sup>[12-15]</sup>。

本文将 XRD 和脉冲展宽技术相结合,测量超短脉冲激光辐照金阴极产生的超短电子束,将所测信号耦合到微带传输线并由示波器读出。通过采用脉冲展宽技术,此探测器时间分辨率可提高约 11 倍。

## 2 装置介绍

图 1 中所示的探测器由 6 个基本组件组成:透射式金阴极,栅网,磁透镜,微通道板(MCP),高压脉冲发生器和电荷收集器,其中 PIN 表示 PIN 二极管,GND 表示电线接地端。光电阴极、接地栅网、MCP 和收集器均位于高真空室内。在熔融石英基板上蒸镀 25 nm 厚的金以制备具有微带线结构的透射光电阴极。阴极条带的宽和长分别为 8 mm 和

35 mm。微带阴极具有两方面的作用,一是具备光电阴极的功能,可将入射光转换为光电子;二是具有微带线的作用,可传输高压斜坡脉冲,使得微带阴极和栅网间存在时变电场,实现电子束的时间放大。在光电阴极和栅网之间有 1 mm 的加速间隙。栅网网格为每毫米 20 线,开孔率为 60%。从栅网到 MCP 输入面的距离为 490 mm。MCP 的厚度为 0.5 mm,直径  $\varphi=56$  mm,微通道直径为 12  $\mu\text{m}$ ,偏置角为 8°,开口比(OAR)大于 60%。MCP 的输入和输出表面先蒸镀 500 nm 的铜,再蒸镀 100 nm 的 Au。在厚度为 1.5 mm 的印刷线路板(PCB)上镀铜微带线构成电荷收集器。微带线的长、宽和厚度分别为 200 mm,8 mm 和 70  $\mu\text{m}$ 。MCP 的输出表面到收集器的距离为 0.5 mm。光电阴极和收集器的电极通过真空密封的射频同轴连接器(SMA)与外部连接。光电阴极的带状输出线上串有两个电容(C),以隔断直流偏置电压。光电阴极的一端通过电阻(R1)接地。圆环形状的磁聚焦透镜由 1320 匝铜线圈组成,透镜内径为 160 mm,轴线方向长度为 100 mm,整个线圈皆被软铁壳包覆,仅在内环面中心开宽度为 4 mm 环形空气缝隙。磁场经狭缝进入漂移区,磁聚焦透镜使阴极面上的光电子成像在 MCP 输入面上。输出信号由带宽为 6 GHz 的示波器测量。

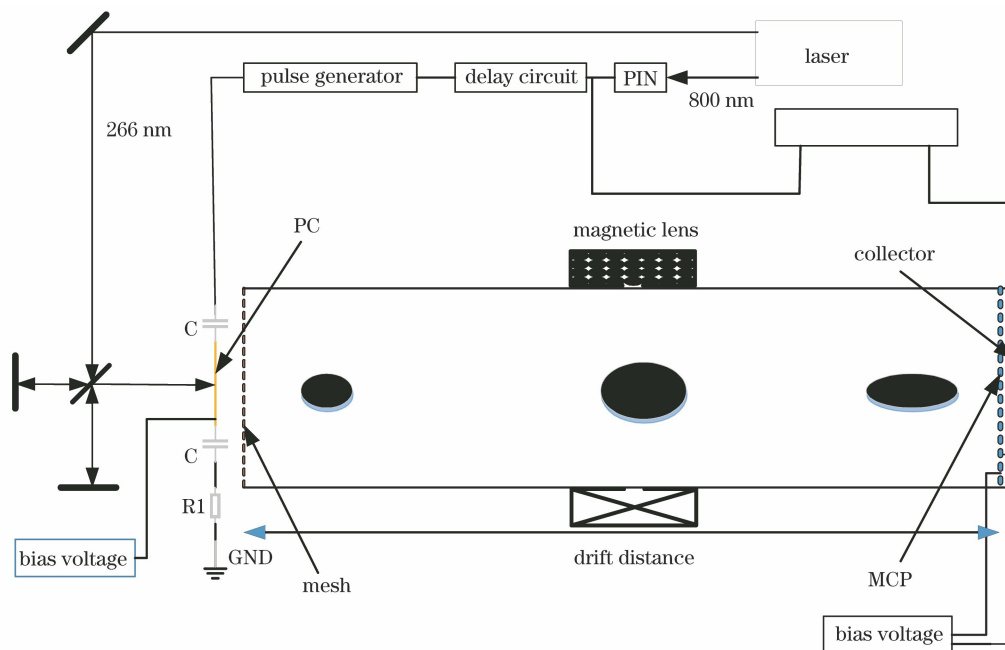


图 1 时间展宽实验测试示意图

Fig. 1 Experimental setup of temporal dilation measurement

### 3 测试结果及分析

实验中采用的飞秒激光器是美国 Quantronix 公司的钛宝石激光器,该系统输出 266 nm 和 800 nm 两路激光。通过 800 nm 三倍频产生波长为 266 nm 的激光,其半峰全宽(FWHM)为 130 fs。自相关配置是迈克耳孙干涉仪,其中入射激光被 50:50 的分束器分成相互垂直的两个部分。266 nm 紫外线激光束通过迈克耳孙干涉仪照射光电阴极,800 nm 激光束用于触发 PIN 探测器(PIN 二极管)。PIN 探测器产生的电信号通过延迟器延迟后,通过触发脉冲发生器来产生加载于光电阴极的展宽脉冲,从而利用延迟器实现紫外(UV)激光脉冲与斜坡脉冲在不同位置处的同步。展宽脉冲使 PC 和栅网之间产生时变的电场,变化的电场赋予电子束轴向的速度色散,使电子束穿过栅网进入漂移区;电子束在到达 MCP 输入面之前,在空间上被展宽,从而实现信号的时间放大。光电阴极上的激光光斑直径约为 3 mm,磁性透镜将光电阴极的电子图像 1:1 成像到 MCP 输入面上,且使电子束聚焦于集电极的几何中心上<sup>[16]</sup>。

利用阻抗渐变线将雪崩三极管线路产生的高压展宽脉冲输入到微带阴极,并将其加载在金阴极上<sup>[17]</sup>。展宽脉冲波形如图 2 所示,点 *a* 到点 *b* 的时间约为 180 ps,两点之间的电压约为 540 V,展宽脉冲从 *a* 到 *b* 的斜率约为 3.0 V·ps<sup>-1</sup>。

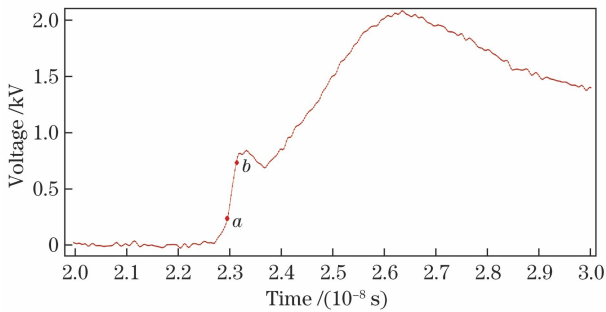


图 2 加载在 PC 上的展宽脉冲波形

Fig. 2 Waveform of dilation pulse applied on PC

当光电阴极和 MCP 只分别加载 -3.0 kV 和 -800 V 的偏置电压时,通过调节迈克耳孙干涉仪,使迈克耳孙干涉仪的两个臂 ARM1 和 ARM2 的脉冲间隔为 45 ps,如图 3 所示,探测器输出信号的 FWHM 约为 450 ps。由图 3 可知,未采用展宽脉冲技术时,在集电极中无法区分两个脉冲 ARM1 + ARM2。集电极输出信号的第一和第二波峰间隔大约为 900 ps。

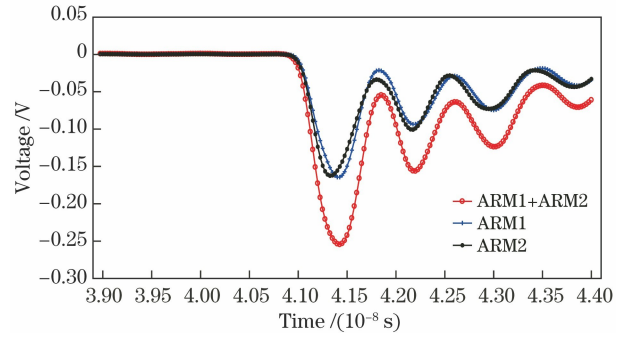


图 3 未展宽迈克耳孙干涉仪不同光路的输出信号

Fig. 3 Output signal of each optical path in Michelson interferometer without dilation

电子束到达 MCP 输入面时的展宽倍率取决于三个因素:阴极偏置电压,阴极展宽脉冲的斜率和漂移管的长度。由于阴栅间隔比较小,可忽略光电子的初能量弥散和空间电荷效应。假设光电子在  $t_i$  时刻进入漂移区,在  $t'_i$  时刻到达 MCP 输入面,即

$$t'_i = d / \sqrt{2eu_i/m} + t_i, \quad (1)$$

式中: $m$  为电子质量; $e$  为电子电荷量; $u_i$  为电子进入漂移区时的阴极电压; $d$  为漂移区长度。

电子束的前端和末端进入漂移区的时刻分别为  $t_1$  和  $t_2$ ,阴极的电压分别为  $u_1$  和  $u_2$ ,在  $t'_1$  和  $t'_2$  时刻分别到达 MCP 输入面, $k$  为展宽脉冲的斜率(V·ps<sup>-1</sup>)。电子束到达 MCP 输入面时的放大倍数  $M$  为

$$M = \frac{t'_2 - t'_1}{t_2 - t_1} = 1 + \frac{d}{t_2 - t_1} \left[ \frac{d}{\sqrt{2e/m}} \left( \frac{1}{\sqrt{u_2}} - \frac{1}{\sqrt{u_1}} \right) \right], \quad (2)$$

$$u_2 = u_1 - k(t_2 - t_1). \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可知,当阴极电压减小,阴极脉冲斜率增大,漂移区长度增大时,电子束的展宽倍率增大。在光电阴极加载 -3.0 kV 的偏置电压,叠加斜率为 3.0 V·ps<sup>-1</sup> 的展宽脉冲,在漂移区长度为 490 mm 条件下,当激光脉冲的同步点在展宽脉冲的点 *a* 与点 *b* 之间时,电子束展宽倍率为 9~13。

在阴极和 MCP 上分别加载 -3.0 kV、-800 V 的偏置电压,对干涉仪双脉冲和展宽脉冲进行同步处理后,测量集电极输出信号,结果如图 4 所示。在图 4(a)中,激光信号与展宽脉冲未同步,光电子信号未被展宽,双脉冲无法区分。在图 4(b)~(e)中,通过调节展宽脉冲的到达时间,获得了同步在展宽脉冲不同点处的激光脉冲输出信号,相应的峰峰间隔分别为 400,430,450,500 ps。

信号的展宽倍率可以根据展宽的输出信号峰峰

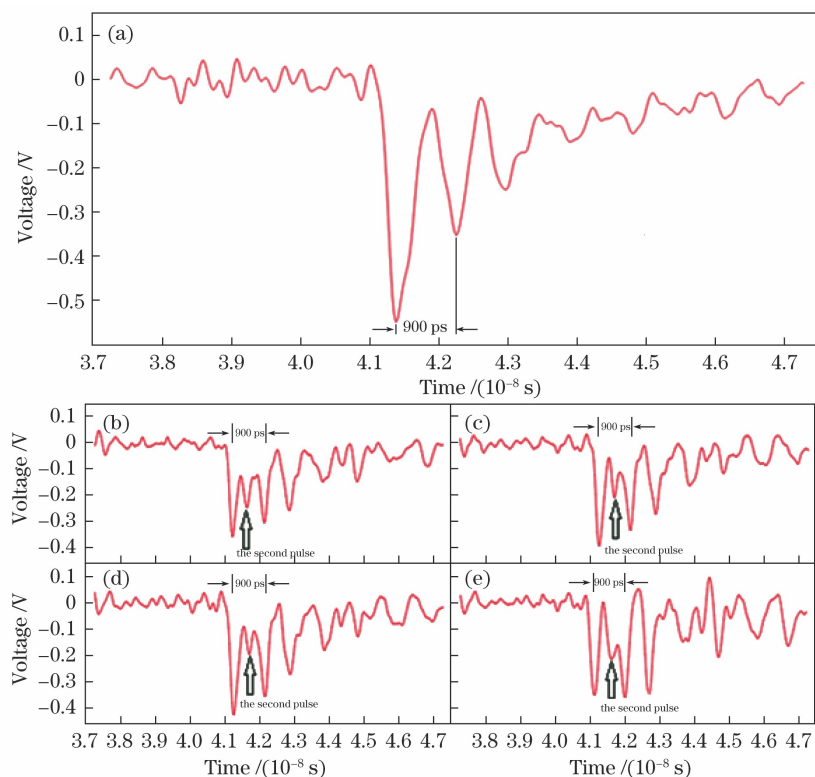


图 4 接收极输出信号。(a)激光和斜坡脉冲未同步结果;(b)~(e)激光同步在斜坡脉冲不同点处的结果

Fig. 4 Collector output signals. (a) Results when laser and ramp pulse are not synchronous;

(b)~(e) results when laser synchronizes at different positions of ramp pulse

间距 $d_{\text{dilated}}$ 和未展宽的输出信号的峰峰间距 $d_{\text{undilated}}$ 来计算,即

$$\lambda = \frac{d_{\text{dilated}}}{d_{\text{undilated}}} \quad (4)$$

由于输入激光脉冲的间隔是 45 ps,由图 4(e)可以看出,采用脉冲展宽技术后探测器的时间响应提高约 11 倍。由(4)式和图 4(b)~(e)所示的展宽后信号峰峰值可知,激光脉冲和展宽脉冲的同步点都在图 2 中的  $a$  点和  $b$  点之间,同步点越靠近  $b$  点展宽倍率越大。

迈克耳孙干涉仪的两路光间隔为 45 ps,电子束经过大于 9 倍的展宽,相应电子束达到 MCP 的间隔大于 400 ps,远大于电子在 MCP 中的渡越时间<sup>[18]</sup>,可见 MCP 具有放大双脉冲信号的作用。

单光路输入时,设备输出信号的 FWHM 约为 450 ps,此宽度要求实验中双脉冲的展宽倍率不能太小;由于输出信号的第一和第二波峰间距约为 900 ps,双脉冲的展宽倍率不能太大,因此实验中展宽倍率更小和更大的结果均未出现。

## 4 结 论

使用迈克耳孙干涉仪和短脉冲激光器,对脉冲

展宽型 XRD 进行了测试。由测试结果可以看出,探测器的时间分辨率提高了约 11 倍。实验过程中集电极和示波器之间的阻抗未能完全匹配,导致示波器显示的输出信号出现振铃,限制了大展宽倍率的获得。后续将重点研究如何减少振铃以提高展宽倍率,以及如何由输出信号重构输入信号。

## 参 考 文 献

- [1] Sorce C, Schein J, Weber F, et al. Soft X-ray power diagnostic improvements at the Omega Laser Facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 10E518.
- [2] Zhang J, Pei W B, Sui C Z, et al. Radiation temperature and X-ray conversion efficiency for laser-cavity target [J]. Acta Physica Sinica, 1991, 40 (3): 424-432. 张钧, 裴文兵, 隋成之, 等. 激光柱型腔靶 X 光温度和 X 光转换效率 [J]. 物理学报, 1991, 40(3): 424-432.
- [3] Sun K X, Jiang S E, Yi R Q, et al. Research on time characteristics of soft X-ray diode [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 68-75. 孙可煦, 江少恩, 易荣清, 等. X 射线二极管时间特性研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(1): 68-75.
- [4] Hou L F, Yang G H, Liu S Y, et al. Development of

- X-ray diode with high performance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 652-656.
- 侯立飞, 杨国洪, 刘慎业, 等. 高性能 X 光二极管的研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 652-656.
- [5] Hou L F, Du H B, Che X S, et al. Initial development of X-ray diodes with transmission photocathode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(9): 092003.
- 侯立飞, 杜华冰, 车兴森, 等. 透射式阴极 X 光二极管初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(9): 092003.
- [6] Hares J D, Dymoke-Bradshaw A K L, Hilsabeck T J, et al. A demonstration of ultra-high time resolution with a pulse-dilation photo-multiplier[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717(1):012093.
- [7] Tirsell K G, Kornblum H N, Slivinsky V W. Time resolved sub-keV X-ray measurements using filtered X-ray diodes[J]. Bulletin of the American Physical Society, 1979, 23(7):807-807.
- [8] Idzorek G C, Tierney T E, Lockard T E, et al. Reproducible, rugged, and inexpensive photocathode X-ray diode[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 10E922.
- [9] Hares J D, Dymoke-Bradshaw A L, Hilsabeck T J, et al. A demonstration of ultra-high time resolution with a pulse-dilation photo-multiplier[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717: 012093.
- [10] Dymoke-Bradshaw A K L, Hares J D, Milnes J, et al. Development of an ultra-fast photomultiplier tube for gamma-ray Cherenkov detectors at the National Ignition Facility (PD-PMT)[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10I137.
- [11] Prosser R D. Electron-dispersion technique for observation of fast transient signals (c. r. o. display appl.)[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1976, 9(1): 57-59.
- [12] Gales S G, Horsfield C J, Meadowcroft A L, et al. Characterisation of a sub-20 ps temporal resolution pulse dilation photomultiplier tube[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 063506.
- [13] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. APL Photonics, 2016, 1(1): 016101.
- [14] 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.
- [15] Fu W Y, Cai H Z, Wang D, et al. Time resolved X-ray image of laser plasma interactions using a dilation framing camera[J]. Optik, 2019, 186: 374-378.
- [16] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, et al. Spatial resolution performance comparison of magnetic double-lens and single-lens framing tubes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 176-181.
- 廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜与单磁透镜分幅变像管空间分辨特性的比较[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 176-181.
- [17] Liu J Y, Niu L H, Peng W D, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(5): 055104.
- [18] Cai H Z, Liu J Y, Niu L H, et al. Theoretical simulation of electron transit time and gain characteristics in microchannel plate[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1542-1546.
- 蔡厚智, 刘进元, 牛丽红, 等. 微通道板中电子时间倍增特性的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1542-1546.