

三通道门控分幅相机及其触发晃动测量

蔡厚智¹, 刘进元¹, 付文勇¹, 雷云飞¹, 廖昱博¹, 龙井华^{2*}

¹深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学物理与能源学院, 广东 深圳 518060

摘要 研制了三通道微通道板(MCP)门控 X 射线分幅相机,其 MCP 微带阴极宽度为 8 mm,相邻两阴极间隔为 2.8 mm,由幅值为 -1.9 kV 和宽度为 210 ps 的门控脉冲进行驱动。采用光纤传光束法测量了相机的触发晃动。实验结果表明,相机的触发晃动约为 94 ps,与高速示波器测得的 90 ps 基本一致。此外,测得相机的时间分辨率约为 100 ps。

关键词 探测器;分幅相机;触发晃动;时间分辨率;惯性约束聚变

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0204001

Gated Framing Camera with Three Channels and Its Trigger Jitter Measurement

Cai Houzhi¹, Liu Jinyuan¹, Fu Wenyong¹, Lei Yunfei¹, Liao Yubo¹, Long Jinghua²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Physics and Energy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A microchannel plate (MCP) gated X-ray framing camera with three channels is developed, in which the width of the MCP microstrip line cathode is 8 mm and the gap between two neighboring photocathodes is 2.8 mm. The photocathode is driven by the gating pulse with the width of 210 ps and the amplitude of -1.9 kV. The trigger jitter of this camera is measured by the fiber bunch method. The experimental results show that the measured trigger jitter is about 94 ps, which is basically consistent with 90 ps by a high-speed oscilloscope. In addition, the measured temporal resolution of this camera is about 100 ps.

Key words detectors; framing camera; trigger jitter; temporal resolution; inertial confinement fusion

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,纳秒量级的激光等离子体 X 射线辐射包含极其丰富的物理信息,需要采用具有皮秒量级时间分辨的超快相机对 X 射线辐射特性进行诊断,即超快诊断技术^[1-5]。超快诊断技术是研究激光等离子体随时间演化、辐射输运等物理现象的关键技术。由于门控微通道板(MCP)分幅相机可以获得 X 射线辐射的二维空间分布及其时间特性,故被广泛应用于 ICF 实验中^[6-8]。

目前,门控 MCP 分幅相机正朝着两个方向发展,即增大 MCP 面积和提高时间分辨率。MCP 较薄,增大其面积比较困难。将多个 MCP 进行拼接是增大其面积的常用方法,目前获得的最大 MCP 面积是 105 mm×105 mm^[9]。MCP 的电子渡越时间弥散较大,这限制了时间分辨率的进一步提高,使得 MCP 门控分幅相机的时间分辨率为 60~100 ps。薄的 MCP(厚度为 0.2 mm)可以减小电子渡越时间的弥散,将相机的时间分辨率提高至 35 ps 左右^[10],但这种相机比较脆弱,增益低,信噪比差。近年来,

收稿日期: 2017-08-07; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、深圳市科技计划(JCYJ20170302153912966, JCYJ20160608173121055)、深圳大学新引进教师科研启动项目(2017015)

作者简介: 蔡厚智(1983—),男,博士,副研究员,主要从事超快诊断技术方面的研究。E-mail: caihlzvfz@163.com

* 通信联系人。E-mail: jhlong@szu.edu.cn

美国 Lawrence Livermore 国家实验室提出采用电子束时间展宽技术来提高时间分辨率,成功地将时间分辨率提高至 10 ps 以内,该技术正处于探索阶段,采用该技术的时间展宽 X 射线分幅相机的空间分辨率还有待进一步提高^[8,11-14]。随着 ICF 研究的不断深入,具有高时间分辨率的相机需给出采集的图像与等离子体作用初始时刻的关系,如在内爆压缩与压缩对称性研究中,需要将 X 射线分幅相机的门控脉冲信号引出,并与激光脉冲信号相比较,从而通过内爆压缩的分幅背光图像来研究内爆推进层内界面的运动轨迹等^[3-5]。这些实验数据准确度的影响因素之一为 X 射线分幅相机的触发晃动。

本文研制了三通道 MCP 门控 X 射线分幅相机,并采用光纤传光法对相机的触发晃动及时间分辨率进行了测量。

2 相机结构

门控 MCP 分幅相机的结构示意图如图 1 所示,相机由 X 射线成像针孔阵列、MCP 变像管、门控脉冲发生器和电荷耦合装置(CCD)组成,其工作原理如参考文献[15]所述。

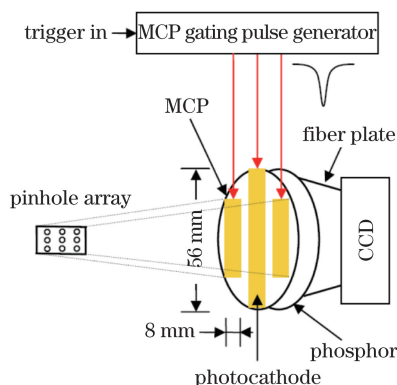


图 1 门控 MCP 分幅相机的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of MCP gated framing camera

MCP 变像管由阻抗渐变线、微带阴极、MCP 和制备在纤维面板上的荧光屏组成,其结构示意图如图 2 所示。门控脉冲信号经 50 Ω 同轴线传输至 MCP 变像管外端的射频连接器(SMA)接头,由于 SMA 接头和 MCP 微带阴极的特性阻抗不同,故需要采用一段阻抗渐变线来连接 SMA 接头和 MCP 微带阴极,以确保门控脉冲传输过程中传输线的阻抗匹配,减小门控脉冲的衰减。

微带阴极将 X 射线转换为光电子以实现光电转换。此外,利用光电阴极制成微带传输线结构,以传输门控脉冲,进而对光电子进行选通。MCP 变像

管含有三条微带阴极,每条阴极宽 8 mm,相邻阴极间隔为 2.8 mm。在 MCP 输入面上先蒸镀 500 nm 厚的铜(Cu),然后再蒸镀 100 nm 厚的金(Au),整个 MCP 输出面接地,并蒸镀与上述厚度相同的 Cu 和 Au。MCP 厚度为 0.5 mm,外径为 56 mm,通道直径为 12 μm,通道间距为 14 μm,斜切角为 6°。对 MCP 输入面的微带阴极加载直流电压或脉冲电压,输出面为地电位,与荧光屏的间距为 0.5 mm,对荧光屏加载直流或脉冲高压。

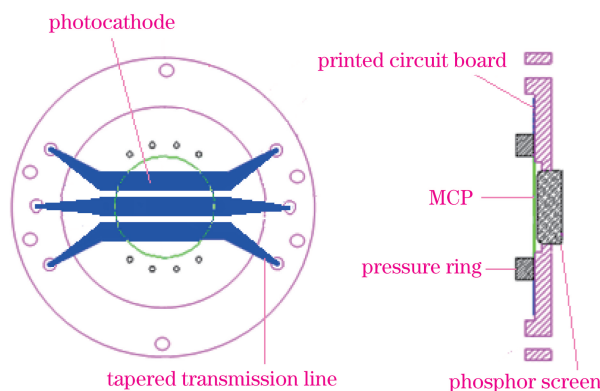


图 2 MCP 变像管结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of MCP imager

荧光屏可接收并转化 MCP 输出电子,是信号的传递、转换器件。MCP 输出电子在 MCP 输出面与荧光屏之间的电场作用下作加速运动并获得能量,高能电子轰击荧光质产生可见光,实现电子和可见光之间的空间和强度的转换,其结构示意图如图 3 所示,其中 ITO 为氧化铟锡。在光纤面板上涂敷一层具有一定面密度、厚度约为 100 μm 的荧光质 P20,再在荧光质上面蒸镀一层导电物质铝(Al),构成一个刚性平滑的面板,即荧光屏。MCP 变像管将激光等离子体 X 射线像转换成可见光图像,实现时空分辨,其工作过程如下: Au 阴极将入射 X 射线转换成光电子,光电子被 MCP 选通、增益并输出,电

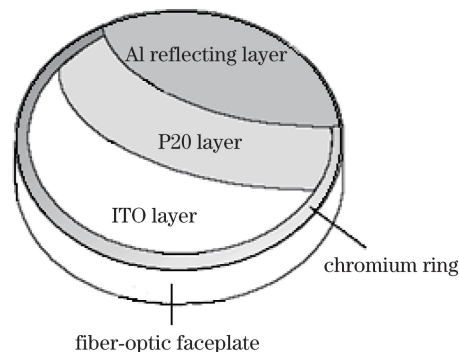


图 3 荧光屏结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of phosphor screen

子被屏压加速并轰击荧光屏形成可见光图像。

门控脉冲发生器由斜坡脉冲电路和脉冲成形电路两部分组成,其基本原理如下:斜坡脉冲电路产生一个有较快前沿的高压斜坡脉冲,再利用此高压斜坡脉冲驱动雪崩二极管脉冲成形电路,从而输出宽度很窄的门控脉冲。电路的结构如参考文献[16]所述。

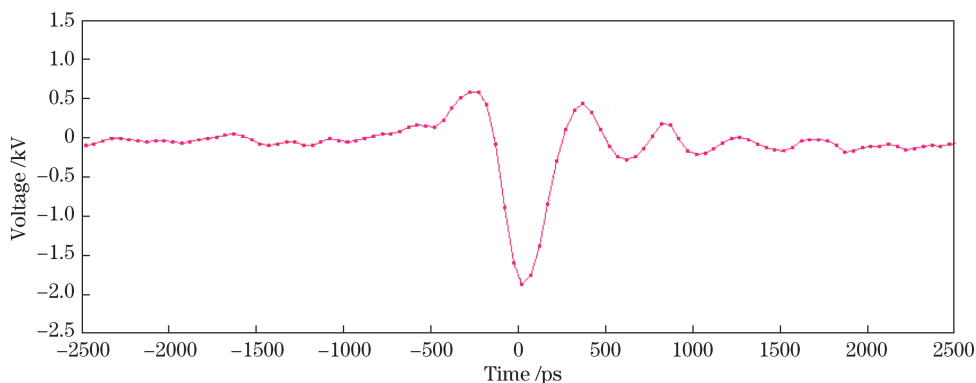


图 4 门控脉冲波形

Fig. 4 Wave form of gating pulse

3.2 触发晃动测量

门控 MCP 分幅相机的触发晃动测量采用光纤传光束法。光纤传光束由 30 根长度依次增大的多模光纤组成,其输出面的排列示意图如图 5 所示,排成三行,每行 10 根光纤,光纤长度依次增加,编号为 1 的光纤长度最短,编号每增加 1,光纤长度增加 2 mm,紫外光在光纤中的传输时间增加 10 ps,从而获得输出时间按 10 ps 均匀递增的 30 个光点。

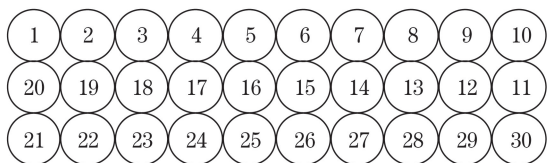


图 5 光纤传光束输出端的光纤排列示意图

Fig. 5 Schematic of fiber array at fiber bunch output end

触发晃动测量装置示意图如图 6 所示。先对 MCP 加载直流电压进行静态实验,测量光纤传光束的静态图像,获得入射光信号的静态分布。再进行动态实验,飞秒激光器输出一个波长为 266 nm、宽度为 130 fs、强度为 0.1 mJ 的光信号,信号经空气延时后传输至光纤传光束输入端,紫外光脉冲经光纤传光束后形成 30 个相邻间隔为 10 ps 的光点,这 30 个光点经透镜成像至 MCP 微带阴极上。飞秒激光器输出的另一个波长为 800 nm 的光信号被分束器分为两路,其中一路被送至 1 号光电二极管(PIN)

3 实验系统及测量结果

3.1 门控脉冲波形

门控脉冲发生器输出的脉冲信号衰减至 1/1000 后送入带宽为 6 GHz 的示波器,获得其波形如图 4 所示,可以看出,门控脉冲幅值为 -1.9 kV,宽度为 210 ps。

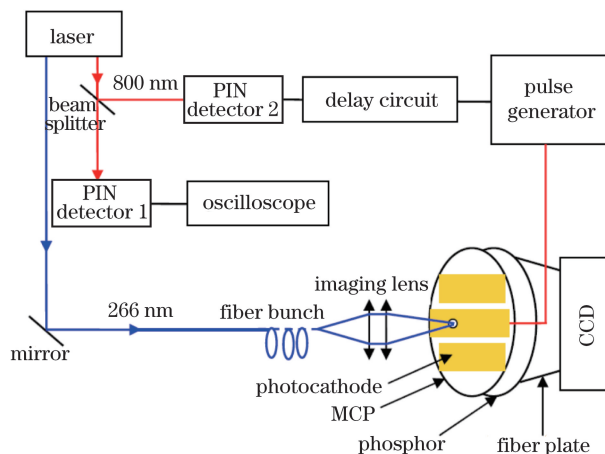


图 6 触发晃动测量装置示意图

Fig. 6 Schematic of trigger jitter measurement device

探测器产生电脉冲信号,并输入至示波器;另一路被送至 2 号 PIN 探测器产生触发信号,进而触发门控脉冲发生器产生门控脉冲。通过调节电路延时,使得 266 nm 紫外光信号与门控脉冲同步到达 MCP 微带阴极,从而使紫外光信号形成的光电子被门控脉冲选通并增益输出,产生可见光动态图像。用 CCD 采集该动态图像,获得光点像的动态分布,根据光点像静态分布归一化处理光点像动态分布,以减小光信号在空间上的强度不均匀性对实验结果造成的影响。再由两光点间的时间间隔,将归一化后动态像的光强-空间分布转换成光强-时间分布。用高斯曲线对实验数据进行拟合,获得了动态像的强

度-时间分布曲线,该曲线的宽度为相机的时间分辨率,强度峰值对应的时间反应了门控脉冲到达 MCP 微带阴极的时间,如果相机触发晃动为 0,则曲线的峰值时间保持不变,通过曲线峰值时间变动情况就可以获得相机的触发晃动。

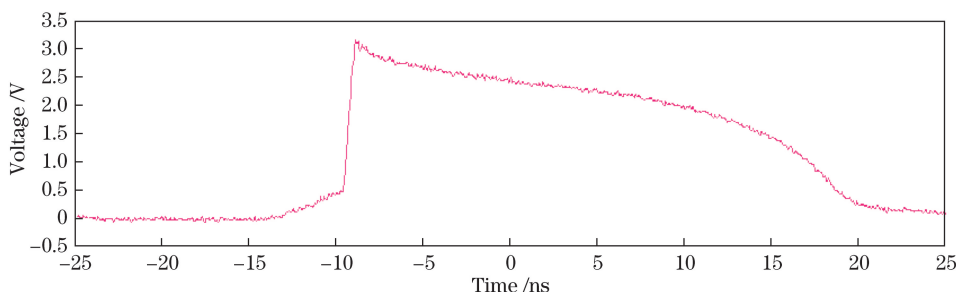


图 7 1号 PIN 探测器产生的电脉冲信号

Fig. 7 Electrical pulse signal generated at PIN detector 1

当对 MCP 加载门控脉冲和 -400 V 的直流偏置电压,且荧光屏电压为 3.4 kV 时,可获得光纤信号的动态图像。进行 1000 次有效实验,从 1000 幅图像中选取 5 幅具有代表性的光纤信号动态图像,不同时刻获得的光纤信号的图像如图 8 所示。图 9 所示为光纤信号的静态图像。将动态图像用静态图像进行归一化处理,然后将归一化后的动态图像的光强-空间分布转换成光强-时间分布。图 10 所示为与图 8 对应的光纤信号图像的光强-时间分布曲线。令图 9 中右上角的光纤编号为 1,右边这列从上往下,光纤编号依次为 1~10,中间这列从下往上编号依次为 11~20,左边这列从上往下编号依次为 21~30。图 10 中,设编号为 1 的光纤信号到达时间为 0 ps ,其他光纤信号的到达时间依次增加 10 ps ,可以得出,相机的触发晃动约为 94 ps ,触发晃动出现在 43 ps 至 94 ps 间的概率为 12% ,触发晃动出现在 0 ps 至 43 ps 间的概率为 88% ,相机的时间分辨率约为 100 ps 。

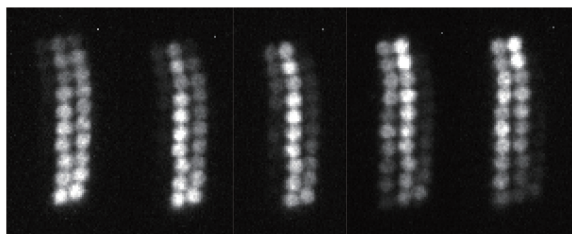


图 8 5 幅具有代表性的动态图像

Fig. 8 Five representative dynamic images

用示波器也可以测量相机的触发晃动,其测量装置示意图如图 11 所示。实验采用带宽为 6 GHz 的单次示波器,飞秒激光器输出的波长为 800 nm 的光信号被分束器分为两路,其中一路被送至 1 号

实验时,用示波器监控 1 号 PIN 探测器产生的电脉冲信号,观测到的脉冲信号如图 7 所示,若信号幅值变化在 $\pm 5\%$ 内,则认为产生的动态图像有效,否则无效。采用此方法可消除激光器时间抖动对相机触发晃动的影响。

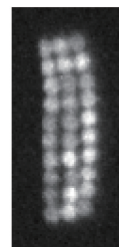


图 9 光纤信号的静态图像

Fig. 9 Static image of fiber bunch signal

PIN 探测器产生电脉冲信号,并触发示波器;另一路被送至 2 号 PIN 探测器产生触发信号,触发门控脉冲发生器产生门控脉冲,门控脉冲通过衰减器输出至示波器。进行 1000 次测量,测得相机的触发晃动为 90 ps ,与光纤传光束法的测量结果基本一致。表 1 所示为采用示波器测量 20 次触发晃动的测试数据。

4 结 论

研制了三通道 MCP 门控 X 射线分幅相机,采用雪崩三极管和二极管研制了门控脉冲电路,获得了幅值为 -1.9 kV ,宽度为 210 ps 的门控脉冲。当对微带阴极加载门控脉冲和 -400 V 直流偏置电压时,采用光纤传光束法获得了光纤动态图像。由归一化动态图像的光强-时间分布获得了相机的触发晃动,其值约为 94 ps ,相机时间分辨率约为 100 ps 。同时,利用示波器测得相机的触发晃动,其值约为 90 ps ,两种方法的测量结果基本一致。基于光纤传光束法的测量装置更加接近于相机在 ICF 应用中的实际连接方式,因而可以获得更为准确的触发晃动测量结果。光纤传光束法为触发晃动的测量提供

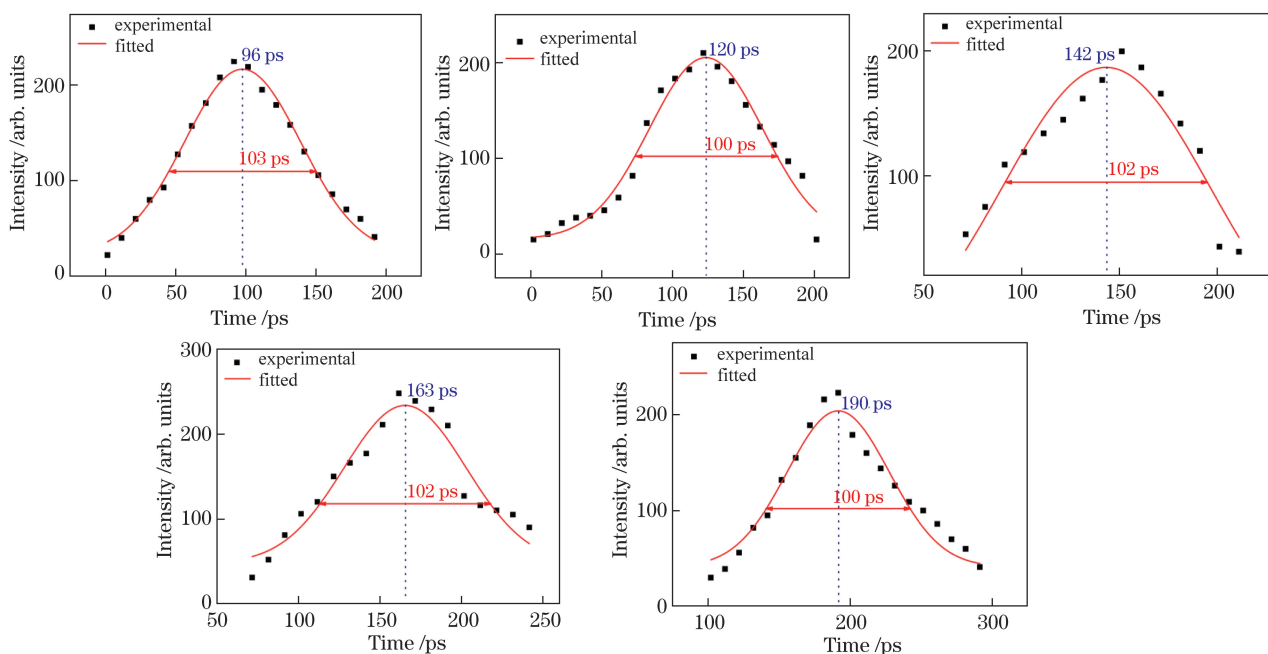


图 10 与图 8 对应的光纤信号的光强-时间分布曲线

Fig. 10 Intensity of fiber bunch signal versus time curves corresponding to Fig. 8

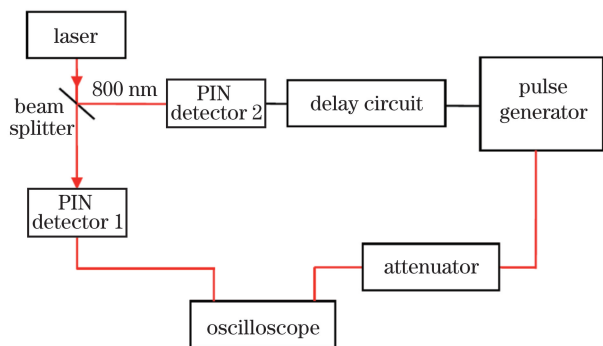


图 11 采用示波器测量触发晃动的装置示意图

Fig. 11 Schematic of trigger jitter measurement device by oscilloscope

表 1 触发晃动测试数据

Table 1 Test data of trigger jitter

Number of experiment	Trigger jitter /ps	Number of experiment	Trigger jitter /ps
1	40	11	16
2	36	12	90
3	20	13	13
4	75	14	12
5	33	15	32
6	41	16	6
7	2	17	20
8	9	18	38
9	30	19	12
10	22	20	20

了一种新的、更为准确的方法。触发晃动与触发信号相关，触发信号的幅值越稳定，宽度越稳定，上升沿越快，则触发晃动越小。触发晃动对触发信号的幅值也有一定要求，当幅值在相机触发阈值的 3 倍以上时，可获得较小的触发晃动。由于触发信号由 PIN 探测器产生，故触发晃动与激光器的稳定性有关，激光器越稳定，触发晃动越小。此外，门控脉冲发生器中晶体管的一致性越高，触发晃动越小。因此，需要采用击穿电压及触发电压阈值一致性高的晶体管来研制门控脉冲发生器。

参 考 文 献

[1] Ping Y, Fernandez-Panella A, Sio H, *et al.* Differential heating: A versatile method for thermal conductivity measurements in high-energy-density matter[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(9): 092701.

[2] Hartley N J, Belancourt P, Chapman D A, *et al.* Electron-ion temperature equilibration in warm dense tantalum[J]. *High Energy Density Physics*, 2015, 14: 1-5.

[3] Yi R Q, He X A, Li H, *et al.* Time response characteristics of X-ray detector system 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.

[4] Cao Z R, Ding Y K, Zhang H Y, *et al.* Electrical

- pulses timing of X-ray framing cameras[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 536-540.
曹柱荣, 丁永坤, 张海鹰, 等. X射线分幅相机电脉冲时标方法研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 536-540.
- [5] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, *et al.* Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China[J]. *Science in China*, 2009, 39(11): 1571-1583.
江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展[J]. *中国科学*, 2009, 39(11): 1571-1583.
- [6] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, *et al.* Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.
- [7] Michel D T, Craxton R S, Davis A K, *et al.* Implosion dynamics in direct-drive experiments[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57(1): 014023.
- [8] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [9] Oertel J A, Archuleta T, Bakeman M S, *et al.* A large-format gated X-ray framing camera[C]. *SPIE*, 2004, 5194: 214-222.
- [10] Bell P M, Killkenny J D, Hanks R L, *et al.* Measurements with a 35-psec gate time microchannel plate camera[C]. *SPIE*, 1991, 1346: 456-464.
- [11] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [12] Lei Y F, Long J H, Liu J Y, *et al.* Design of framing image tube with large detection area[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904009.
- [13] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via Matlab[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012301.
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦分幅变像管静态空间分辨率的 Matlab 模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 012301.
- [14] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013201.
- [15] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Investigation of large-format microchannel plate gated X-ray framing camera[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2013, 30(1): 30-34.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 大面积 MCP 选通 X 射线分幅相机的研制[J]. *深圳大学学报理工版*, 2013, 30(1): 30-34.
- [16] Cai H Z, Liu J Y. Investigation and application of ultrafast pulse circuitry[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, 27(1): 33-36.
蔡厚智, 刘进元. 超快脉冲电路的研制及应用[J]. *深圳大学学报理工版*, 2010, 27(1): 33-36.