

文章编号: 0253-2239(2008)07-1274-05

微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机的研制

牛丽红 刘进元 彭文达 牛憨笨 杨勤劳 廖 华 周军兰 张劲松

(深圳大学光电子学研究所, 广东 深圳 518060)

摘要 设计并研制了一种新的微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机, 相机系统由带有行波选通微带光电阴极的近贴聚焦分幅变像管、电控单元、针孔安装和调节系统及真空系统组成。电控单元提供相机工作需要的直流电压和脉冲开关电压。输出图像由采用光纤面板耦合到荧光屏的 CCD 相机读出。采用厚 50 nm 的 Au 作为变像管光电阴极, 相机谱响应范围 0.1~10 keV。可获得八幅分幅图像, 每幅曝光时间 1 ns, 2 ns 和 5.0 ns 三档可调, 像幅时间间隔分 2 ns, 5 ns 和 10 ns 三档可调。相机动态空间分辨率优于 18 lp/mm, 触发抖动小于 100 ps, 时间抖动小于 5%。并可实现远距离监视、控制和数据采集。对相机静态特性和动态特性的实验标定及应用现场所获得的实验结果均表明, 相机工作性能稳定, 具有几何畸变小、动态范围大等特点, 满足 Z-箍缩实验研究的需要。

关键词 X 射线光学; 分幅相机; 变像管; 微通道板选通

中图分类号 TN143; O536 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082807.1274

Microchannel Plate Gated X-Ray Nanosecond Framing Camera

Niu Lihong Liu Jinyuan Peng Wenda Niu Hanben Yang Qinlao

Liao Hua Zhou Junlan Zhan Jinsong

(*Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518060, China*)

Abstract A novel microchannel plate (MCP) gated X-ray nanosecond framing camera is developed. The camera system consists of a proximity-focused framing image-converted tube with traveling-wave gated micro-stripe optoelectric cathode, an electronic control unit, a mechanical system for pinholes mounting, adjusting and a high vacuum system. The electronic control unit provides all the power supply of the camera system including voltage to phosphor screen, gating pulses to MCP, bias and static checking voltage of MCP. The images are recorded with a scientific CCD camera coupled to the fiber optic phosphor screen. The photocathode of image-converted tube consists of Au of 50 nm thickness. Eight framing images can be obtained. The energy spectrum response of the camera ranges from 0.1 keV to 10 keV. The exposure time of the camera can be changed is 1 ns, 2 ns and 5 ns in three scales and time interval between frames from 2 ns, 5 ns and 10 ns in three scales. The dynamic spatial resolution is better than 18 lp/mm. The triggering jitter is down to 100 ps with exposure time shifting less than 5%. The fiber remote transmission and control are incorporated in the nanosecond framing camera system. The achievement experimental results on the static, dynamic characteristics and Z-pinch application show that the camera can run in a strong electromagnetic environment. In this case, the camera has little geometric distortion and wide dynamic range and provides good control and high capturing rate. Such a camera system can be utilized in the investigation of Z-pinch for recording X-ray.

Key words X-ray optics; framing camera; image converted tube; microchannel plate gating

1 引 言

采用变像管高速摄影对等离子体辐射的时间和空间特性进行精确诊断, 是深入了解等离子体 X 射线发射机制、辐射输运、内爆动力学过程及辐射流体

力学等物理过程的重要途径^[1], 并因此对实验诊断设备的性能提出了很高要求。为了测量等离子体辐射的两维空间分布随时间变化的情况, X 射线分幅技术由此发展起来^[2]。

收稿日期: 2007-10-19; **收到修改稿日期:** 2008-01-07

基金项目: 国家 863 计划和深圳大学科研基金(200730)资助课题。

作者简介: 牛丽红(1963-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事光电成像技术、变像管高速摄影技术等方面的研究。

E-mail: niulh@szu.edu.cn

国际上曾经提出并尝试过多种实现皮秒和纳秒分幅摄影的方案^[3-5]。其中典型的技术如光学分幅/偏转快门法^[6,7]，曝光时间可达数百皮秒。但是该方案实现的技术难度较大，相机的动态空间分辨力和稳定性较低，并且很难进一步减小曝光时间。点阵采样扫描分幅技术也已得到了成功应用^[8,9]，优点是相机可实现小于 100 ps 的曝光时间，可以获得的画幅数多。但是该方案由于点阵采样使得其空间分辨力受到了限制，并且需要从扫描图像经过处理得到分幅图像，增加了技术的复杂性和图像处理的量化噪声。随着高速高压电脉冲技术的发展，采用行波选通微通道板 (Microchannel plate, MCP) 近贴聚焦变像管的方案具有突出的优点而受到广泛的重视，取得了很大进展^[10,11]。

根据 Z-箍缩 (Z-pinch) 实验的需求，设计并研制了一种采用行波选通 MCP 近贴聚焦的 X 射线宽量程纳秒八分幅相机。在 MCP 上制备八条独立微带线，通过八通道电路系统的独立控制，既可满足 8 幅图像单幅曝光时间 1 ns、2 ns、5 ns 可调，又可满足画幅时间间隔为 2 ns、5 ns、10 ns 可调的需求，使相机能够满足实验过程中的多种不同用途需要，观测 Z-箍缩等离子体箍缩末期和崩毁阶段软 X 射线辐射场空间分布及时间演化，给出等离子体发光区域的箍缩和扩张的速度、压缩比、不稳定性的演化信息。

2 相机的设计与系统结构

相机系统由带有行波选通微带光电阴极的近贴聚焦 X 射线分幅变像管、电控系统两个基本组件组成，并配有针孔阵列及调节装置、CCD (Charge coupled device, CCD) 相机读出系统、独立真空系统三个可选组件，如图 1 所示。其中行波选通 X 射线分幅变像管是诊断系统的关键部件，由 MCP、厚度 50 nm 的 Au 微带光电阴极和制作在光纤面板上的

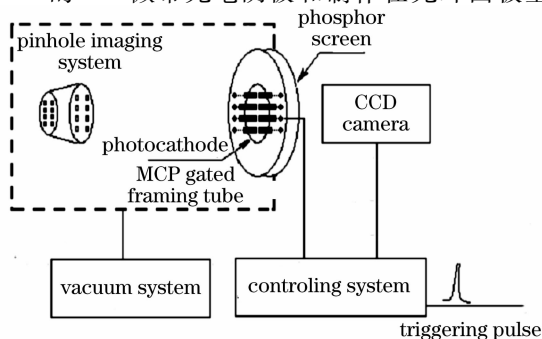


图 1 相机系统结构

Fig. 1 Configuration of the developed camera

P20 荧光屏组成。宽度 6mm、间隔 2 mm 的八条对称分布的微带阴极蒸镀在 MCP 的输入面上，选通电脉冲通过以 MCP 为电介质的微带线作用在 MCP 上。

当被摄目标的 X 射线图像经 8 个针孔分别成像在 8 条微带光电阴极上时，如果通过微带线给 MCP 加有合适的快门脉冲电压，电脉冲沿微带线传输，只有在电脉冲通过微带线的时间区域内，MCP 可实现有效电子倍增，使该时间区域内微带线上的 X 射线产生的光电子被增强，并聚焦在荧光屏上输出可见光图像。如果以一定的时间间隔和时序对 8 条微带线分别施加快门脉冲，则 8 条微带线将按照一定时间间隔和时序逐次被选通，在荧光屏上将得到相应的 8 幅分幅图像。每幅图像的曝光时间与电脉冲的宽度有关。

相机的空间分辨力由针孔成像系统的空间分辨力和行波分幅管的空间分辨力决定。限制针孔空间分辨力的主要因素是几何投影和衍射效应，由针孔的大小、X 射线的波长 λ 和放大倍率 M 、物距 s 等决定。当物距一定的条件下存在一个最佳针孔直径^[10]

$$D_B = \text{sqrt}[1.22sM\lambda/(M+1)^2], \quad (1)$$

在最佳针孔直径下，物面最小可分辨像元的半峰全宽 (FWHM)

$$D_m = \text{sqrt}\left[\frac{1.22s\lambda}{(M-1) \times D_B} + \frac{D_B(M+1)}{M}\right]. \quad (2)$$

本系统成像针孔直径取 50 μm 。由于针孔成像系统的空间分辨力与使用条件有关，在性能标定中相机的空间分辨力仅指分幅管的空间分辨力。分幅管的空间分辨力由 MCP 的通道直径、电极深度、荧光屏的空间分辨力、光纤面板的纤维直径及 MCP 的输出面与荧光屏的近贴距离等决定。其中 MCP 的输出面与荧光屏的近贴距离是限制分幅管空间分辨力的主要因素。从 MCP 输出的光电子到达荧光屏上的弥散半径^[11]

$$r = 2l \sqrt{v/V}, \quad (3)$$

这里 v 是电子逸出的横向初电位， l 是 MCP 的输出面与荧光屏的近贴距离， V 是 MCP 输出与荧光屏间的电压。对本相机系统而言，近贴距离为 0.5 mm，MCP 输出与荧光屏间的电压为 4 kV。针对本相机的分幅管参量，通过计算每个部件的空间调制传递函数 (MTF)，可计算整管的 MTF 曲线。从计算结果可知，空间频率为 20 lp/mm 对应的 MTF 为 0.4，满足实际使用要求。

相机的时间分辨力可由画幅上任一空间位置的曝光时间来计算。曝光时间定义为 MCP 增益与时

间关系曲线的半峰全宽,显然快门脉冲的宽度决定了分幅图像的曝光时间。当快门脉冲宽度位于皮秒量级时,相机的曝光时间与快门脉冲宽度、幅度、形状、以及 MCP 的关系比较复杂,很难用解析法给出定量结果^[10]。当快门脉冲宽度位于纳秒量级时, MCP 电子渡越时间对曝光时间的影响可以忽略,快门脉冲的宽度决定了分幅图像的曝光时间。

为了实现 8 分幅成像,需要在 MCP 上蒸镀 8 条微带线。为了实现大的画幅尺寸,微带线的宽度要尽可能加宽。由于微带线加宽使传输阻抗降低,对选通脉冲提出更高的要求,不但要求 8 路分别驱动,而且要求线路具备高的驱动能力^[12]。相机电控系统由单片机、8 路选通脉冲发生器、7 路延时器、8 路脉冲宽度控制器、MCP 偏置电源和相应软件组成。其中选通脉冲发生器是电控系统的核心部分,决定曝光时间的大小,产生原理如图 2 所示。考虑到如果用一路选通脉冲分成两路或多路选通脉冲,则选通电脉冲之间需要很长的传输线来延时。由于

传输线的衰减作用,导致多路选通脉冲的幅度不一致,最终将影响到增益的一致性,因此本系统特别设计了独立产生 8 路选通脉冲的技术方案,脉冲宽度分为 1 ns, 2 ns, 5 ns 三档可调。

为实现远距离监视、控制和数据采集,相机系统设计了远程控制方案。由主控制计算机将指令发送到分幅相机控制系统,完成与电控系统的远程通信。为获取低背景噪声,大动态范围图像,系统采用美国仙童公司(Fairchild)公司的 Condor-486EF 制冷型科学 I 级 16-bit CCD,像元数为 4096×4096,像元尺寸为 15 μm×15 μm。工作时 CCD 光纤面板与像管荧光屏光纤面板直接耦合,以提高光能利用率。

3 实验与结果

动态实验测量装置如图 3 所示。YAG900 主被动锁模 Nd:YAG 激光器产生的光脉冲经放大、四倍频,获得波长为 0.266 μm、脉冲半峰全宽 30 ps 的紫外光,并经平行光管将鉴别率板或光纤输出像成在 MCP 的微带阴极上。触发光经 PIN 光电转换后输出电脉冲信号触发脉冲发生器,对 MCP 施加快门脉冲电压,通过适当设置延时使电路与光路同步,获取相机的动态图像,从而标定相机的动态空间分辨力、曝光时间等动态性能参量。图 4 是利用该测量装置获得的动态空间分辨力像,空间分辨力为 18.87 lp/mm。理论分析表明,由于动态工作时的脉冲驱动电压仅作为开关的作用,对成像质量没有显著的影响。因此近贴式变像管其静态和动态空间分辨力没有太大的差别。

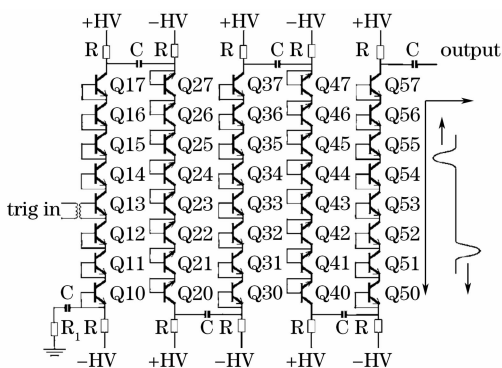


图 2 选通脉冲产生原理图

Fig. 2 Schematic diagram of gating pulse generation

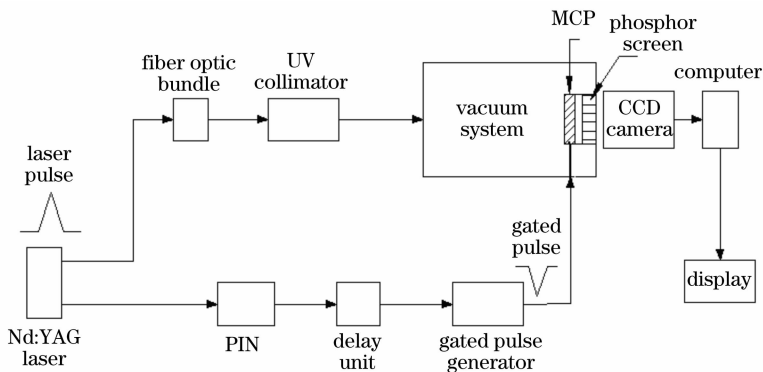


图 3 动态测试装置图

Fig. 3 Experimental setup for dynamic performance calibration

曝光时间作为相机的主要技术指标之一,也是设计电路控制部分时需要考虑的关键指标。通常测量相机曝光时间是采用法布里-珀罗(F-P)标准具产

生光强度依次衰减、时间间隔一定的光脉冲链,并通过调整全反镜和半反透镜之间的距离获得所需要的脉冲时间间隔,再根据相机有效曝光时间内所采

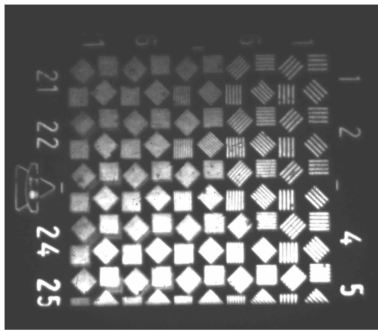


图 4 动态空间分辨力

Fig.4 Dynamic spatial resolution

集到的光点数计算曝光时间。考虑到相机最长曝光时间 5 ns,为了提高测量精度必须适当增加光点数目,由于阴极成像面有限。故在一维方向上阴极可容纳的光点数较少,因此限制了曝光时间的测量精度。实验设计了光纤传光束测试系统,传光束由一组长短按照一定等差数列排列的光纤组成,相邻两根光纤的长度差根据测量精度的要求设定,出光口端按照光纤长短在一个平面内依次两维排列。其进口端面 and 出口端面光纤空间分布如图 5 所示。当同一束脉冲激光照射到进口光端面时,光通过各光纤的长度不同。因此光在不同光纤中传播时间不同,则各光纤输出的光脉冲按一定时间间隔(由光纤长度差值决定)依次从出口端面出射。例如,实验采用长度相差 25 mm 的光纤时间差为 75 ps,则 30 根光纤将输出 30 个时间间隔为 75 ps 的激光脉冲序列,可以测量的时间范围是 $\Delta t = 75 \text{ ps} \times 29 = 2175 \text{ ps}$ 。

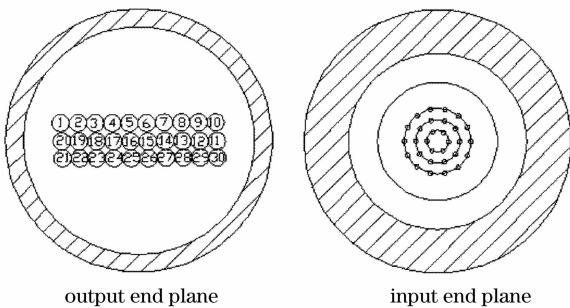


图 5 光纤传光束进出口端面图

Fig.5 Input and output end plane of fiber optic transmission

利用光纤传光束测试系统,实验分别测量了相机的各档曝光时间,图 6 是 1 ns 档曝光时间的单幅图像,图 7 是经高斯拟合后脉冲的半峰全宽。其余两档测量结果分别为 4.75 ns、2.1 ns(1 ns 档的实际曝光时间为 0.96 ns)。多次采集曝光时间数据进行统计计算,得到相机的时间抖动小于 5%,相机触

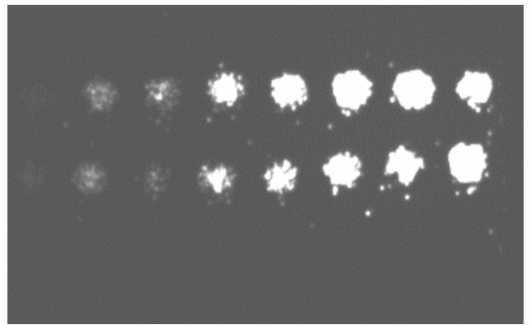


图 6 1 ns 曝光时间图像

Fig.6 Image with 1 ns exposure time

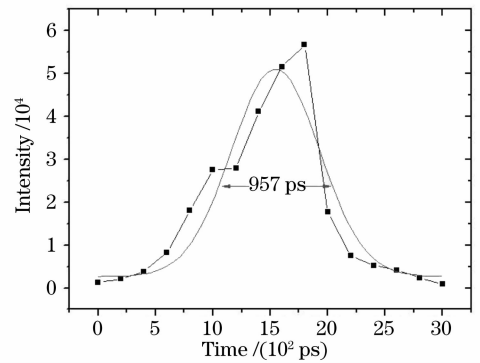


图 7 经高斯拟合后的脉冲

Fig.7 Exposure intensity curve fitted with Gaussian model

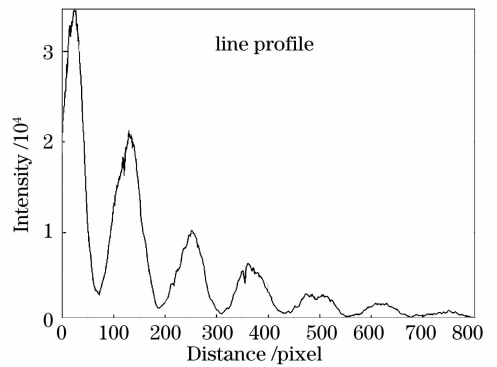


图 8 光脉冲序列图像的强度标定结果

Fig.8 Image intensity of pulse train calibrated

发晃动小于 100 ps。由于实验条件所限,实验未能够对相机的动态范围进行精确测量,仅对 F-P 标准具产生强度半衰减的光脉冲序列成像,实验结果表明相机的动态范围优于 128,图 8 是所得标准具光脉冲序列图像的强度标定结果。

实验同时对相机系统的抗电磁干扰能力进行了测量。测量结果表明,较强的电磁干扰未影响相机的正常工作。

将相机系统应用于加速器 Z-箍缩内爆过程研究。共进行了 9 次实验。其中 3 次由于加速器运行原因无 X 射线发射或信号漂移没有记录到图像外,

其余 6 次均成功记录了 X 射线八分幅图像。图 9 是相机系统记录的 Z-箍缩内爆过程 X 射线八分幅图像,曝光时间为 5 ns,幅间隔为 5 ns,其中第一幅像距 X 光峰值为 22 ns。

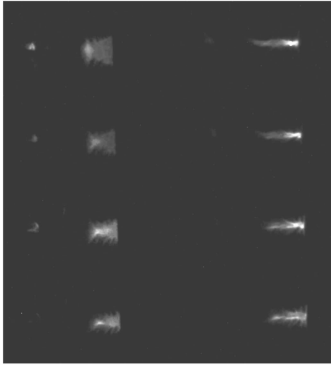


图 9 相机记录的 X 射线八分幅图像

Fig. 9 Eight X-ray framing images recorded with the camera

4 结 论

针对 Z-箍缩实验研究的需要,设计并研制了 X 射线纳秒分幅相机系统。针对行波选通和 MCP 近贴聚焦的特点,对像管的制作工艺和微带线的有效连接做了特殊设计,从而保证了分幅像管的空间分辨力和行波的高效可靠传输。针对八微带阴极实现八分幅的特点,对电控系统做了特别设计,保证线路具备高的驱动能力的同时,实现了 8 路分别驱动功能。

利用 Nd:YAG 激光器的四倍频皮秒脉冲激光对相机的动态性能进行了测量,实验结果表明该相机的欧姆损耗小,空间分辨力高,动态范围大,触发晃动和时间抖动均较小,快门脉冲电子学线路工作稳定,抗干扰能力强。应用于加速器 Z-箍缩内爆过程的研究表明,该相机适用于 Z-箍缩研究需要。

参 考 文 献

1 Niu Hanben. Technique of image tube diagnostics[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1989, **18**(3): 196~205

牛憨笨. 变象管诊断技术[J]. *高速摄影与光子学*, 1989, **18**(3): 196~205

2 Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Liu Zhongli *et al.*. A study of pinhole array scanning imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 573~574

江少恩,郑志坚,刘忠礼等. 针孔阵列扫描成像系统研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 573~574

3 Hou Xun. Progress of high speed photography and photonics in China[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4948**: 30~37

4 Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Zhang Kaizhi *et al.*. Calibration method for non-uniformity between multiple images from a high-speed multi-frame CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 531~535

江孝国,王 远,张开志等. 高速分幅成像系统中多路图像性能不一致的校正方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 531~535

5 Graham W. Smith, Mark J. Riches, Roger B. Huxford *et al.*. The ultra, a new approach to ultra high speed framing cameras [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4183**: 105~118

6 Chang Zenghu, Hou Xun, Zhang Xiaoqiu *et al.*. Investigation of soft X-ray picosecond framing camera [J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1988, **17**(1): 1~6

常增虎,侯 询,张小秋等. X 射线皮秒变像管分幅相机研究 [J]. *高速摄影与光子学*, 1988, **17**(1): 1~6

7 Lin Zunqi, He Xingfa, Lin Kangchun *et al.*. Successful application of X-ray picosecond framing camera first time in China [J]. *Chin. J. Lasers*, 1991, **18**(8): 639~640

林尊琪,何兴法,林康春等. 我国首台皮秒级 X 射线分幅相机试用成功[J]. *中国激光*, 1991, **18**(8): 639~640

8 Guo Baoping, B. Cunin, Niu Hanben. High repetition rate trigger mode streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 442~444

郭宝平, B. Cunin, 牛憨笨. 高重复频率触发模式扫描相机[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 442~444

9 Liu Lixin, Qu Junle, Lin Ziyang *et al.*. A high repetition rate picosecond streak camera for two-photon excited fluorescence life time microscopic imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 373~378

刘立新,屈军乐,林子扬等. 用于双光子激发荧光寿命显微成像的高重复频率皮秒扫描相机[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 373~378

10 Chang Zenghu, Shan Bing, Liu Xiuqin *et al.*. Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2549**: 53~59

11 Shan Bing, Chang Zenghu, Liu Jinyuan *et al.*. MCP gated picosecond X-ray framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5): 449~456

山 冰,常增虎,刘进元等. 四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机[J]. *光子学报*, 1997, **26**(5): 449~456

12 Jinyuan Liu, Lihong Niu, Wenda Peng *et al.*. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**: 055104-1~055104-4