

单一视角 X 射线分幅变像管设计

宗方轲^{1,2}, 张敬金¹, 雷保国¹, 郭宝平^{1,2}, 杨勤劳^{1*}

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深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 针对传统 X 射线快门选通微通道板(MCP)分幅相机利用针孔阵列获取目标图像时视角不一致的问题,提出一种单一视角 X 射线变像管分幅方法。利用电子束团在电子光学交叉点所携带信息的全息性和可分割性,设计了一种单一视角多幅输出图像的静电聚焦变像管,输出端配接 MCP 分幅单元以实现图像选通和增强功能。与传统快门控 MCP 分幅管相比,其既能实现图像视角的同一性,又可以避免直穿光激发荧光屏对输出图像的影响,具有更高的信噪比。所设计的分幅变像管阴极有效工作直径为 40 mm,输出荧光屏直径为 40 mm,放大倍率为 1.29,中心理论空间分辨率达到 60 lp/mm,边缘空间分辨率达到 26 lp/mm,分幅曝光时间特性由快门选通 MCP 分幅单元的选通脉宽决定。该方法为实现 X 射线分幅相机视角同一性给出了一条有效途径。

关键词 光学器件; 分幅相机; 超快光学; 微通道板选通; 变像管

中图分类号 TN143; O536 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0523001

Design of X-Ray Framing Camera with Single Perspective

Zong Fangke^{1,2}, Zhang Jingjin¹, Lei Baoguo¹, Guo Baoping^{1,2}, Yang Qinlao¹

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

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract In view of the inconsistent perspective in target images obtained by pinhole array for traditional X-ray gating micro channel plate (MCP) framing camera, an implement method of X-ray framing camera with single perspective is proposed. At the electro-optic intersection in electrostatic focus image tube, the electrons carry holographic information, and can be divided into multiple output images with single perspective, subsequently a gated MCP unit is matched with the frame to enhance the target image. Compared with the traditional gated MCP framing camera, the designed framing camera realizes identity of image perspective and avoids direct light's excitation on screen, and a higher signal-to-noise ratio is obtained. The designed framing image tube has an effective input working diameter of 40 mm, an output image diameter of 40 mm, a magnification of 1.29, the center spatial resolution of 60 lp/mm in theory, the marginal spatial resolution of 26 lp/mm, and the geometric distortion of less than 15%. Single frame exposure duration is determined by shutter pulse time of gated MCP framing unit. This method is an effective way to realize identity of image perspective for X-ray framing image camera.

Key words optical devices; framing camera; ultrafast optical; gated micro channel plate; tube

OCIS codes 230.2090; 230.7020; 100.0118; 320.7100

1 引 言

变像管超快诊断技术是在飞秒激光、等离子体辐射以及核爆等超快发光现象研究中探测时间和空间特性的重要手段^[1-2]。在惯性约束激光核聚变(ICF)研究中,特别需要深入了解等离子体 X 射线的发射机制、辐射输运、内爆动力学及辐射流体力学等超快物理过程^[3-4],这些都离不开变像管相机。X 射线皮秒分幅相

收稿日期: 2016-12-19; 收到修改稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ230659)

作者简介: 宗方轲(1983—),男,博士后,主要从事超快信息获取技术方面的研究。E-mail: zongfk168@163.com

* 通信联系人。E-mail: qlyang@szu.edu.cn

机是获取 X 射线辐射二维空间信息及其随时间演变过程的重要手段,在核聚变研究中分析其内爆动力学特性时具有不可替代的重要地位,对深入了解核聚变的演化过程以及实现人工可控聚变技术具有重要意义^[5-6]。

现阶段皮秒级 X 射线分幅相机通常采用行波选通门控微通道板(MCP)分幅技术^[7-8],被摄目标通过针孔阵列直接成像于 MCP 的光阴极微带上,光阴极与荧光屏采用近贴聚焦方式成像,最终成像画幅数由前端的针孔阵列成像系统决定,即有几个针孔就成几幅像。由于分幅相机不同幅像对应着不同的针孔,所以分幅相机不能实现对目标同一视角的连续成像,虽然针孔与针孔之间距离很小,且对目标的视角相差不是很大,但是对于 ICF 靶丸的内爆特性研究,针孔数目越多,其视角差异就越大,对探测精度的影响仍然比较严重。目前,常用的分幅相机的曝光时间为 40~100 ps,画幅数约为 16^[9]。鉴于分幅管采用近贴聚焦方式成像,X 射线直穿光对荧光屏信噪比的影响就不可消除。

本文针对分幅相机视角的一致性问题上提出了一种新的解决途径。设计了一种多幅输出图像的静电聚焦变像管,输出端配接常规 MCP 选通分幅单元,构成了新的单一视角分幅变像管。该途径利用多分幅静电聚焦变像管,通过减少针孔数目解决了门控 MCP 分幅管的视角差异问题,保证了输出图像的视角一致性。此外,静电聚焦变像管可以采用一定技术措施避开直穿光的影响,易于提高信噪比。模拟分析变像管成像特性表明该技术途径是可行的。

2 分幅变像管原理

现有门控 MCP X 射线皮秒分幅相机主要由以下几部分组成:多针孔成像阵列、皮秒选通高压脉冲发生器、微带型 MCP 选通单元和数字 CCD 相机读出系统等^[10],相机原理如图 1 所示。目标物辐射的射线经过针孔阵列成像到 MCP 选通单元的输入面上,MCP 输入面为光阴极面,为了适合高压选通脉冲的传输,光阴极被做成微带型传输线结构,几条微带相互平行,选通脉冲在微带中传输作为 MCP 快门以控制光电子的通断,当选通脉冲加载后沿着微带线传输时,光信号输入区域依次被选通产生光电子,辐射出的电子经 MCP 增强、电场聚焦加速后轰击荧光屏产生可见光图像并由 CCD 读出系统记录,没有加载选通脉冲的区域则处于截止状态。合理设置各微带线之间的时间延迟,即可得到一系列时间间隔相同的目标图像。门控 MCP 分幅相机的空间分辨能力决定于针孔阵列系统和 MCP 选通单元的空间分辨能力,而其曝光时间主要由选通脉冲宽度确定,同时还会受到电子渡越时间涨落的影响^[11]。

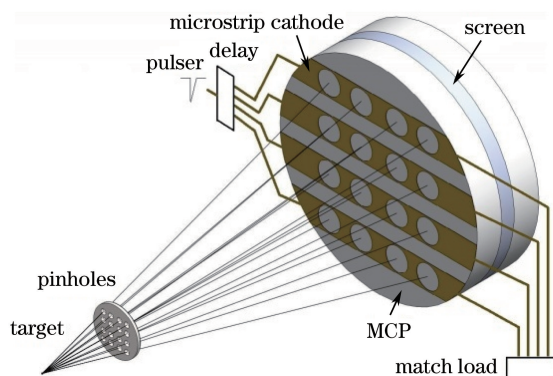


图 1 X 射线分幅相机结构示意图

Fig. 1 Schematic of X-ray framing camera

相机的空间分辨力由两部分组成,即针孔阵列成像系统的空间分辨力和脉冲门控 MCP 选通单元的空间分辨力。由于针孔成像是几何投影,衍射效应是限制其空间分辨力的主要因素,当物距一定的条件下,最佳分辨状态对应最佳针孔直径^[12],即有

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

式中 D_B 为针孔直径, λ 为探测射线的波长, M 为成像系统的放大倍率, s 为物距。在最佳分辨下,物面最小可分辨像元的峰值半峰全宽(FWHM)可表示为

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

在给定物距和最佳分辨情况下,通过放大倍率可以计算分幅管图像的视角差。例如,在放大倍率为 5,靶丸与阴极距离 600 mm 的系统中^[13],直径为 1 mm 的靶丸在光阴极上的像直径为 5 mm,如果在 36 mm 长的微带上成 16 幅像,则每幅像之间的间隔为 6.36 mm,二者相对目标的视角差为 0.58°,同一微带上第一幅与最后一幅之间的距离为 30 mm,则二者相对目标的视角差为 2.88°,相隔距离最大的两条微带上像的距离最大为 42 mm,二者相对目标的视角差为 4.07°。

为了实现分幅变像管输出图像视角的同一性,本文利用静电聚焦变像管中电子束在交叉点位置具有全息性和可分割的特性,设计了一种十字形分幅偏转器,其利用偏转板分割交叉点电子束,实现单一视角目标图像的多幅输出,从而确保分幅管画幅视角的一致性,输出端耦合常规选通 MCP 分幅单元实现图像的选通与增强。分幅管的光阴极有效直径为 $\phi 40$ mm,输出图像直径为 $\phi 40$ mm,以便与现有 $\phi 40$ mm 门控 MCP 分幅单元耦合,其结构示意图和分幅原理如图 2 所示。十字形分幅偏转器装在阳极光阑的出口处,由两组相互垂直的平板偏转器组成,每组偏转器包含三个相互平行的平板电极,中间电极为零电位,两边电极为正电位,第一组偏转器的中间电极位于电子束交叉斑的中心,当电子束经过电子透镜的聚焦作用后经阳极光阑到达分幅偏转器,经第一组偏转器后,电子束被平均切割为左右两份,再经第二组偏转器时被上下分割,这样四束带有同等信息的电子束经偏转电压作用分离,形成四幅同视角同时刻的目标像。

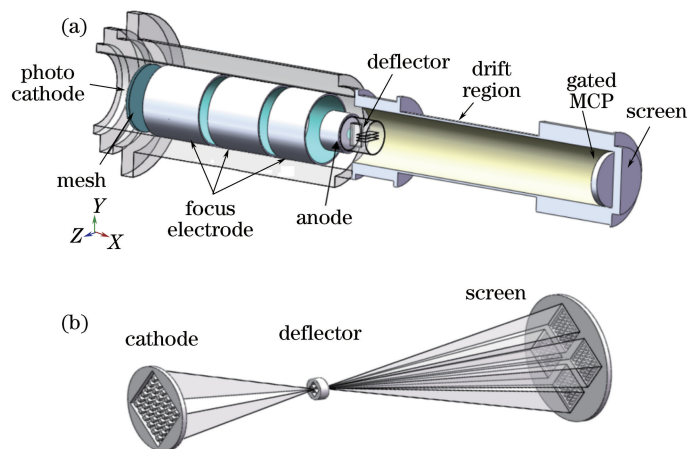


图 2 分幅变像管结构示意图和原理图。(a)结构示意图;(b)原理图

Fig. 2 Structure and schematic diagram of designed framing image tube. (a) Structure diagram; (b) schematic diagram

与常规的门控 MCP 分幅管不同,这里的 MCP 输入面微带只作为选通快门,不作为光阴极使用。被摄目标经针孔阵列成像于变像管的阴极面上,光阴极发射光电子经电子光学透镜聚焦,在交叉点被偏转板分割,最后成像于 MCP 微带上,此时通过微带线给 MCP 加载适当的快门电脉冲,电脉冲沿着微带传输过程中依次选通特定区域,使特定时间段内特定区域的电子图像通过 MCP,经高压电场加速轰击荧光屏,转换成可见光被 CCD 记录。

3 分幅管的设计与模拟结果

分幅变像管按照图 2 给出的结构建立数值模型进行设计,其电子光学系统采用两组轴对称的静电聚焦透镜,其利于改善系统像差,提高像面整体空间分辨性能。为了便于偏转板分割电子束,适当优化分幅管电子光学系统,使电子束交叉点位于阳极光阑附近。经过优化计算,最终确定分幅管在最佳工作状态下的最优参数为:光阴极有效工作直径为 $\phi 40$ mm,输出图像直径为 $\phi 40$ mm,管的总长为 424 mm,阳极工作电压为 8 kV,阴极栅极间场强为 1.4 kV/mm,放大倍率为 1.29。分幅管电子光学聚焦系统电位分布如图 3 所示,轴上电位分布如图 4 所示。

利用随机抽样的蒙特卡罗方法模拟分幅管中电子发射过程,追踪电子飞行轨迹,并统计电子落点位置,

计算中心和边缘的空间调制传递函数(MTF)。分幅管的 MTF 可以表示为^[14]

$$M = \exp[-(\pi r f)^2], \quad (3)$$

式中 f 为空间频率, M 为调制度, r 为电子落点位置弥散斑均方根半径。输出图像的 MTF 曲线如图 5 所示, 离轴距离越大图像分辨能力越低, 离轴距离越小图像分辨能力越高, 图像中心分辨力最高, 由摄影理论分辨极限可知, 当对比度下降为 15% 时, 输出图像中心极限分辨率为 60 lp/mm, 边缘极限分辨率为 26 lp/mm, 可以满足分幅变像管的使用要求。

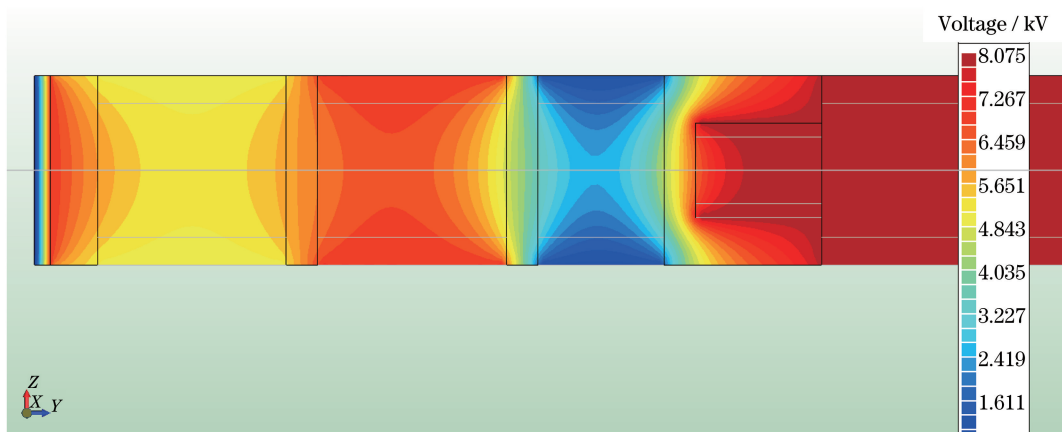


图 3 分幅管电子光学聚焦系统电位分布

Fig. 3 Potential distribution of electronic optical focusing system for framing image tube

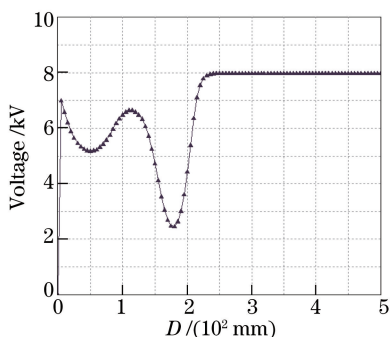


图 4 轴上电位分布

Fig. 4 On axis potential distribution

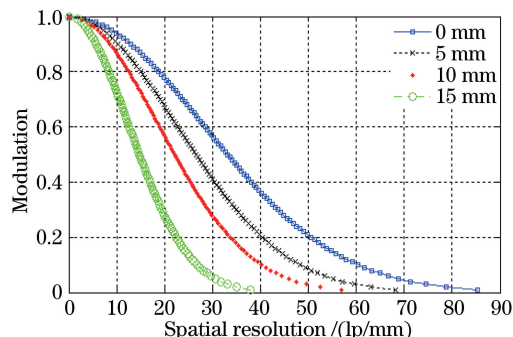


图 5 输出图像中心及边缘的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves on the image surface center and edge

4 实验测试及结果验证

为了验证分幅管的设计结果及其分幅特性, 制作开放性的实验样管, 并搭建实验平台测试了分幅管电子光学交叉斑位置、交叉斑大小、静态成像效果以及分幅性能。在搭建的实验平台上, 用紫外辐射光源照射 $\phi 40$ mm 的光阴极, 辐射的光电子通过电子光学透镜聚焦成像, 在电子光学交叉斑位置放置荧光屏记录电子束的强度分布。电子交叉斑光强分布如图 6 所示, 强度峰值为 5385, FWHM 为 60 pixel, 全宽为 120 pixel, 由 CCD 的像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 可推算出电子束斑直径为 3.6 mm, 由束斑大小可以确定阳极光阑的最佳尺寸和分幅偏转器的尺寸和位置, 以确保电子束斑既不被遮挡, 又能拦截大角度电子改善图像对比度, 提高分幅管的空间分辨能力。

将阴极更换为刻有分划图案的光阴极, 测试变像管的静态成像性能, 结果如图 7 所示。其中, 图 7(a) 为阴极表面的分划板图案, 分划板中心为两组横竖条纹, 条纹宽度分别为 $83.3 \mu\text{m}$ 和 $71.4 \mu\text{m}$, 对应空间频率分别为 12 lp/mm 和 14 lp/mm, 四周 4 组横竖条纹分别为 15、20、25 和 30 lp/mm, 静态分辨率测试结果如图 7(b) 所示, 4 幅图像亮度分布呈对称分布, 且具有大致相同的分辨能力。静态图像条纹的空间调制度测试结果如表 1 所示, 荧光屏上分出的 4 幅图像中, 上面两幅图相比下面两幅调制度稍高, 这与电子束斑中心

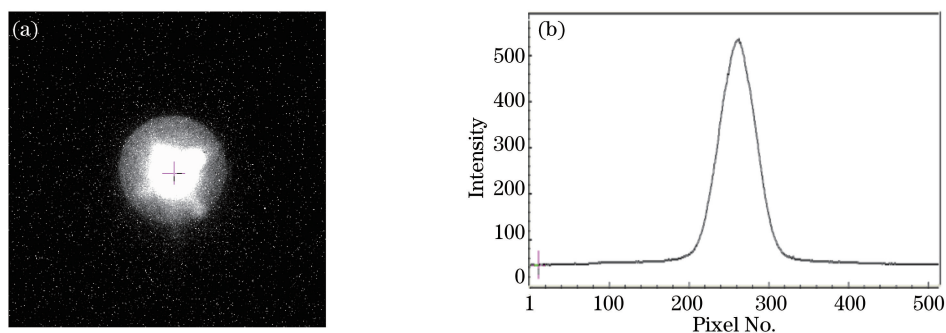


图 6 (a)交叉斑电子束;(b)光强分布

Fig. 6 (a) Electron beam crossover; (b) intensity distribution

与管子轴心配合误差有关,20 lp/mm 空间频率的调制度大于等于 8%,说明其分辨可以达到 20 lp/mm。鉴于偏转器的中间电极板具有一定厚度,其切割电子束时难以避免遮挡和吸收部分电子,从而导致荧光屏中心图像的亮度降低,即对图像亮度的均匀性产生了一定影响,为了降低这种影响,中心电极板的厚度要尽可能薄且能够保持足够强度确保不变形。由于偏转器对图像亮度的影响与距中心的距离具有固定关系,可以通过后期亮度校正以提高图像亮度的均匀性。利用无分划刻度的面光电阴极可以测试整个荧光屏亮度的二维分布,按照亮度分布曲线对测试图像进行校正,即可消除偏转器中心电极对图像亮度均匀性的影响。

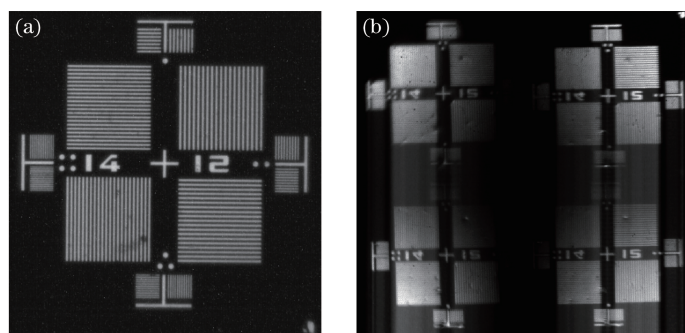


图 7 分幅管的静态分辨率测试结果。(a)分划板图案;(b)静态测试结果

Fig. 7 Results of static resolution of the framing tube. (a) Reticule pattern; (b) static test results

表 1 静态图像条纹对比度

Table 1 Stripe contrast of static images

Position /(lp/mm)	Upper left	Upper right	Left lower	Low right
15	0.1153	0.1019	0.2156	0.1795
20	0.0950	0.0805	0.1365	0.1327

5 结 论

在现有常规门控 MCP 分幅相机的成像原理的基础上,分析了视角不一致的根本原因,计算了 16 分幅相机中针孔阵列相对靶目标图像的视角差。针对常规分幅技术获取的图像视角不一致问题,提出了一套分幅方案,并设计了一种新的分幅变像管系统。该分幅管利用十字形偏转器在电子束交叉点位置分割电子束,实现了单一视角目标的多幅图像输出,确保了分幅成像视角的同一性。通过合理设置入射光与光电阴极夹角,避开了直穿光对分幅相机荧光屏的影响,从而提高了荧光屏的信噪比。

利用制作的实验样管进行实验验证,测试结果表明,所设计的分幅变像管阴极有效工作直径为 $\phi 40$ mm,空间分辨力达到 20 lp/mm,能达到分幅相机的实际使用性能要求。该分幅方案为解决 X 射线分幅相机输出图像视角的同一性提供了有效的技术途径。

参 考 文 献

- [1] Gu Li, Zong Fangke, Li Xiang, *et al.* Designment of a femtosecond streak camera with a novel accelerating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1134001.
顾 礼, 宗方轲, 李 翔, 等. 一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1134001.
- [2] Benedetti L R, Holder J P, Perkins M, *et al.* Advances in X-ray framing cameras at the National Ignition Facility to improve quantitative precision in X-ray imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 023511.
- [3] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [4] Cai Houzhi, Long Jinghua, Liu Jinyuan, *et al.* Non-gain microchannel plate picosecond framing technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(s1): 109-112.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 无增益微通道板皮秒分幅技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(s1): 109-112.
- [5] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.* Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(01): 0117001.
蔡厚智, 刘进元, 彭 翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制[J]. *中国激光*. 2012, 39(01): 0117001.
- [6] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.* Investigation of picosecond X-ray framing camera [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2012, 29(2): 123-128.
蔡厚智, 刘进元, 彭 翔, 等. X 射线皮秒分幅相机的研制[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2012, 29(2): 123-128.
- [7] Zong Fangke, Yang Qinlao, Gu Li, *et al.* Design of large-format X-ray framing image tube [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2386-2390.
宗方轲, 杨勤劳, 顾 礼, 等. 大面积 X 射线分幅变像管的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2386-2390.
- [8] Niu Lihong, Liu Jinyuan, Peng Wenda, *et al.* Micro channel plate gated X-ray nanosecond framing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1274-1278.
牛丽红, 刘进元, 彭文达, 等. 微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机的研制[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1274-1278.
- [9] Shan B, Chang Z H, Liu J Y, *et al.* MCP gated picosecond X-ray framing camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(5): 449-456.
- [10] Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu, *et al.* Gated MCP soft X-ray picosecond multi-framing camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(5): 596-600.
成金秀, 杨存榜, 温天舒, 等. 门控 MCP 软 X 射线皮秒多分幅相机 [J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(5): 596-600.
- [11] 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]. *Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 716-718.
- [12] Chang Z H, Shan B, Liu X Q, *et al.* Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time [C]. *SPIE*, 1995, 2549: 53-59.
- [13] Bai Xiaohong, Bai Yonglin, Liu Baiyu, *et al.* SG diagnostic equipment: gating pinhole framing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 367-373.
白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 神光原型诊断设备: 门控针孔分幅相机的研制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 367-373.
- [14] Gong hui, Zhou Liwei, Ni Guoqiang, *et al.* Study on the root mean square (RMS) radius of spatial-temporal aberrations in imaging electron-optical systems [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 507-512.
公 慧, 周立伟, 倪国强, 等. 成像电子光学系统空间和时间像差的均方根半径 (RMS) 研究 [J]. *光学技术*, 2011, 37(4): 507-512.