

# 大面积 X 射线分幅变像管的设计<sup>\*</sup>

宗方轲, 杨勤劳, 顾 礼, 李 翔, 张敬金

(深圳大学 光电工程学院, 深圳大学 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘 要:** 提出了一种实现大工作面积分幅变像管的方法。设计了一种大输入光电阴极、小输出图像的静电聚焦变像管, 输出端配接常规小工作面积快门选通微通道板(MCP)分幅管单元, 实现图像选通和增强功能。这种分幅变像管与直接采用大面积 MCP 相比, 不仅省去了制作大面积 MCP 的高昂成本, 而且避免了由于微带线过长引起的选通脉冲传输衰减大、增益不均匀性严重等固有缺陷。设计的分幅变像管输入阴极有效直径 100 mm, 输出图像直径 40 mm, 放大倍率为 0.4。中心空间分辨力达到 14.4 lp/mm, 边缘空间分辨力达到 11.2 lp/mm, 几何畸变不超过 15%, 其分幅特性由 MCP 分幅单元决定。

**关键词:** 大工作面积; 分幅相机; 微通道板选通; 变像管; 电子光学器件

**中图分类号:** TN143; O536

**文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20122410.2386

在惯性约束聚变(ICF)研究中, 需要对等离子体辐射的 X 射线进行时间和空间特性的测量, 以便深入了解等离子体 X 射线发射机制、辐射输运、内爆动力学及辐射流体力学等物理过程。变像管超快诊断技术是研究等离子体辐射时间和空间特性的重要手段<sup>[1]</sup>。X 射线皮秒分幅相机, 能给出 X 射线辐射二维空间信息和随时间的演变过程, 在靶丸内爆均匀性、压缩对称性、体积压缩比、内爆时间、内爆速度等内爆动力学特性研究中获得重要应用, 对了解高温高密度等离子体临界面运动规律、界面不稳定性、辐射场不均匀性以及辐射非平衡特性具有重要意义<sup>[2]</sup>。ps 级 X 射线分幅相机普遍采用行波选通 MCP 分幅技术<sup>[3]</sup>。随着 ICF 研究等的不断深入, 对分幅相机提出了更高的要求, 即不仅要求更短的曝光时间, 还要求有更大的工作面积。目前常用的小工作面积分幅相机的曝光时间为 60~100 ps, 画幅数为 12~16 幅<sup>[4]</sup>。采用薄 MCP(0.2 mm)技术, 可以将曝光时间缩短到 35 ps 以下<sup>[5-6]</sup>, 但这种分幅相机的信噪比差, 增益低, 工作面积小, 尚处于探索阶段。而在大面积分幅相机的研究中遇到了很多技术难题, 根据曝光时间和空间分辨力等性能的要求, MCP 厚度在 0.5 mm 以下, 不仅增加了大面积 MCP 的制作难度和成本, 而且使用大面积 MCP 又带来了一系列难以克服的技术难题, 如选通脉冲在 MCP 微带上传输衰减的补偿、增益不均匀性等。

本文针对扩大分幅相机工作面积问题, 提出了一种新的途径。设计了一种大输入光电阴极、小输出图像的静电聚焦变像管, 输出端配接常规小工作面积 MCP 选通分幅管单元, 构成了新的大工作面积分幅变像管。该途径既避开了制作大面积 MCP 的高昂成本, 又避免了由于微带线过长引起的选通脉冲衰减补偿的技术难度和增益不均匀性等难题。经过对变像管的成像特性等进行模拟分析表明, 该技术途径是可行的。

## 1 大工作面积分幅变像管的设计考虑

现有门控 MCP 皮秒 X 射线分幅相机由多针孔成像阵列、皮秒选通高压脉冲发生器、微带型 MCP 选通管和 CCD 读出系统等五个部分构成, 相机原理示意图见图 1。多针孔成像阵列是由厚度为 20  $\mu\text{m}$  的铪材料做成的, 上面刻有 8~16 个针孔, 每个针孔直径为几十  $\mu\text{m}$ , 目标正是通过这些针孔成像在阴极微带上, 阴极微带上的每一幅像与阵列上的一个针孔相对应。分幅相机用高压选通脉冲来控制 MCP 中光电子的通断, MCP 输入面上平行排布多条金(Au)微带传输线电

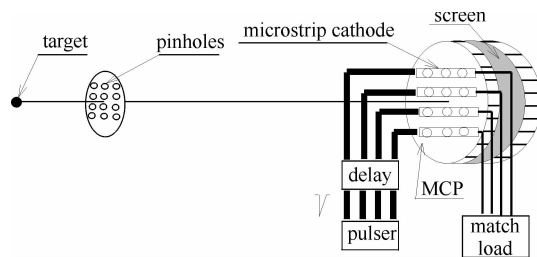


Fig. 1 Schematic diagram of X-ray framing camera

图 1 X 射线分幅相机结构和原理示意图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-01-24; 修订日期: 2012-04-27

作者简介: 宗方轲(1983—), 男, 博士研究生; zongfk168@163.com。

通信作者: 杨勤劳(1953—), 男, 研究员, 博士生导师; qlyang@szu.edu.cn。

极,同时又为选通管光阴极。当选通脉冲发生器产生的高电压选通脉冲施加到微带线时,沿微带线传播方向按时间顺序使 MCP 开通,使有输入光信号的区域产生光电子,该光电子经 MCP 增强、加速并轰击荧光屏,转换成可见光并由 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,同一 X 射线源经多个针孔所成的多幅像在选通脉冲的作用下将被依次选通,输出的可见光图像被 CCD 记录。对目标的空间分辨能力由针孔直径、被测 X 射线波长、成像系统放大率以及 MCP 选通管的空间分辨力确定。而选通管的曝光时间则主要由选通脉冲宽度  $\tau$  确定(约为  $\tau/3$ ),此外还与电子在 MCP 中的渡越时间涨落有关。

高压脉冲沿着 MCP 上的微带线传输的过程中存在一定的损耗,其幅值按照指数关系衰减,微带线的电压传输特性方程<sup>[7-8]</sup>

$$V(x, t) = V_0 \exp(-\alpha x) \exp[j(\omega t - \beta x)] \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为初始时刻电压脉冲的幅值;  $\alpha$ ,  $\omega$  和  $\beta$  分别为电压脉冲传输的衰减常数、相移常数和角速度。本文中只考虑电压幅值的衰减,文献[8]中  $\alpha$  的测量值为  $0.05 \text{ cm}^{-1}$ ,根据 MCP 的工作原理可知,增益与电压的关系为  $G = CV^n$ ,其中,  $G$  为增益;  $C$  为增益常数;  $V$  为 MCP 板间电压;  $n$  为 MCP 离散打拿极级数。不同型号尺寸的 MCP,  $n$  的取值有所差异,根据当前分幅相机使用的 MCP 参数,  $n=7$ 。电脉冲沿着微带线传输 40 mm,电压幅值衰减到 81.87%,增益衰减到 24.65%;传输 100 mm 电压幅值衰减到 60.65%,增益衰减到 3.02%。对于  $\phi 40 \text{ mm}$  的小面积 MCP,通过各种技术措施可以补偿电压幅值的衰减,其增益均匀性还比较理想。而对于  $\phi 100 \text{ mm}$  的大面积 MCP,由于微带传输电压衰减引起的增益不均匀性严重影响了分幅相机的性能,成为限制扩大分幅相机工作面积的瓶颈。

为了实现分幅变像管的大面积成像,本文提出了一种新的技术途径,利用静电聚焦变像管可改变电子成像放大倍率的特点,设计一种大面积输入光电阴极、输出图像缩小的变像管,输出端耦合小面积选通 MCP 分幅管单元,在不增大 MCP 的前提下,实现扩大分幅管工作面积的目的。例如,设计变像管的光阴极有效直径为  $\phi 100 \text{ mm}$ ,而输出图像为  $\phi 40 \text{ mm}$ ,以便与现有  $\phi 40 \text{ mm}$  选通 MCP 分幅单元耦合。其结构示意图如图 2 所示。

与常规的选通 MCP 分幅管不同,在这里, MCP 微带只作为选通快门,不作为阴极使用。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 并被倍增,经高压电场加速轰击荧光屏,转换成可见光被 CCD 记录下来。

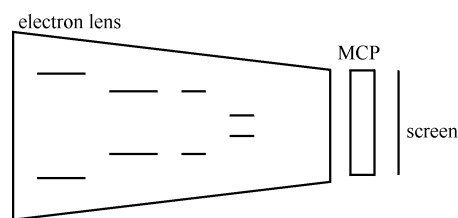


Fig. 2 Schematic diagram of framing image tube

图 2 分幅变像管结构示意图

## 2 大面积分幅变像管的设计与模拟结果

为保证获得良好的成像性能,同时便于调节放大倍率和像面位置,分幅变像管采用轴对称 6 电极组成静电聚焦透镜。在建立的变像管模型中,适当增大第一聚焦极直径,降低电场边缘效应对电子束的影响有利于扩大变像管工作面积。通过求解变像管模型,得到了变像管内部的电位分布和电子运动轨迹,确定了变像管相关参数。通过追踪随机发射的电子轨迹,并统计其在像面上的落点分布,计算了变像管的空间调制传递函数,确定变像管性能。

经过反复优化计算,所设计的大面积分幅管光电阴极最大直径为 140 mm,有效工作直径为  $\phi 100 \text{ mm}$ ,输出图像为 40 mm,光阴极到成像面距离  $D$  为 600 mm。分幅管电子光学系统电位分布示于图 3,轴上电位分布示于图 4。阴极电位为 0,栅网电位为 7 kV,阴极栅极间场强为 1.4 kV/mm,第一聚焦极电位为 5 kV,第一阳极电位为 7 kV,第二聚焦极电位为 0.6 kV,第二阳极电位为 8 kV,放大倍率为 0.4。适当提高阴栅间场强,有利于提高空间分辨力。

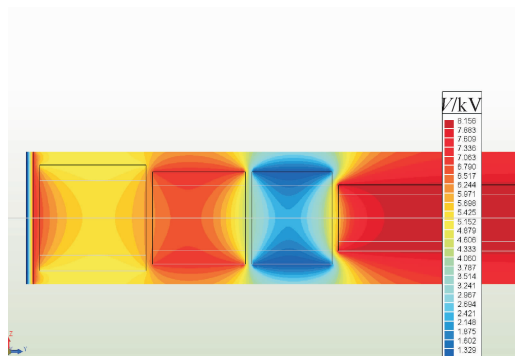


Fig. 3 Potential distribution of electronic optical system

图 3 电子光学系统电位分布

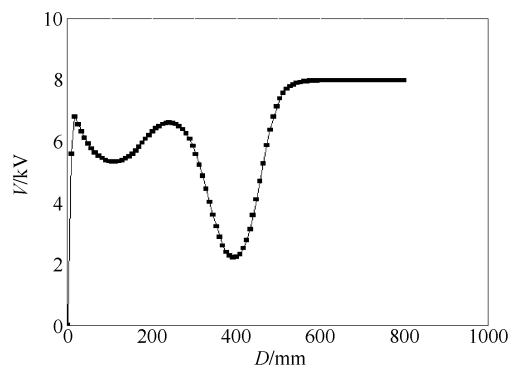


Fig. 4 Distribution of axial potential

图 4 轴上电位分布

通过对电子轨迹的计算模拟,分别给出了分幅管输出图像放大倍率、几何畸变和空间分辨力。图 5 是离中心不同距离的特征电子轨迹,交叉斑位置在第二阳极入口处,交叉斑束斑半径为 5.11 mm,像面位置在距离阴极极面 600 mm 处。5 条轨迹离中心距离分别为 10, 20, 30, 40, 50 mm, 放大倍率分别为 0.34, 0.35, 0.36, 0.38 和 0.40, 由此可知,输出图像的最大几何畸变为 15%。由于分幅管的工作面积较大,考虑到实际应用的特殊性,光阴极没有采用球面结构而采用平面结构,虽然适当拉远了像面距离,图像畸变仍然比较大。不过这可以通过后期数字图像处理进行校正,校正后图像的几何畸变可以减小到 5% 以内,亮度不均匀性可以降低到 10% 以内<sup>[9]</sup>。

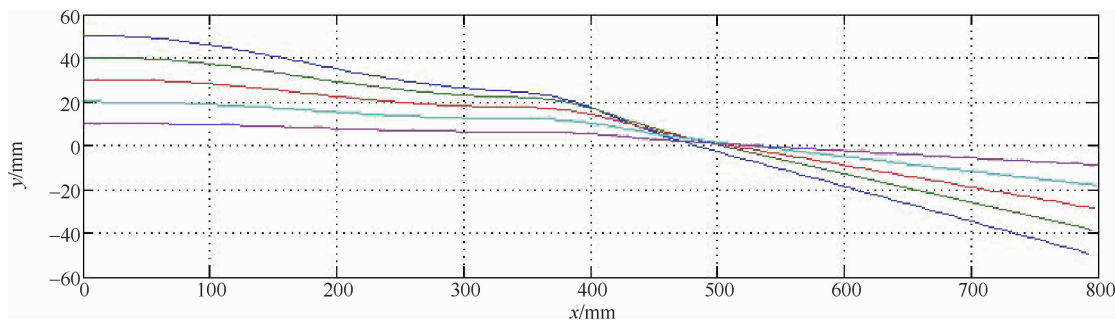


Fig. 5 Characteristic electron trajectories for different distance from center

图 5 离中心不同距离的特征电子轨迹

模拟计算了分幅管中心和边缘的空间调制传递函数。分别从阴极中心和边缘随机抽样发射出 300 个电子,初能量满足  $(0, 1 \text{ eV})$  上的  $\beta(1, 4)$  分布,初角度分布服从余弦分布。电子经过聚焦系统在像面上的分布见图 6(a),对这些电子的位置进行统计,其位置分布直方图见图 6(b),由此获得弥散斑半径  $r = 15 \mu\text{m}$ ,根据调制频率  $f$  与对比度  $M$  的关系式  $M = \exp[-(\pi r f)^2]$  可以计算出变像管的空间调制传递函数(MTF)。

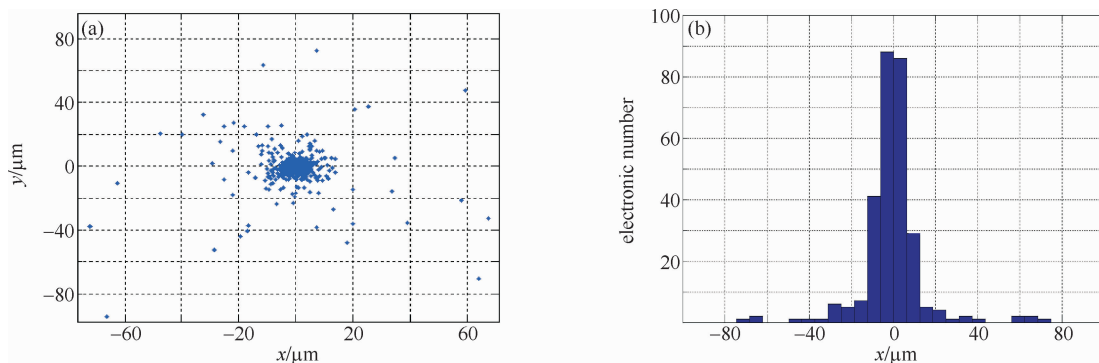


Fig. 6 Electron diffuse plaques on image surface center and position histogram

图 6 输出图像中心电子弥散斑及位置统计直方图

图 7(a)为输出图像中心的 MTF 曲线,可见输出图像中心分辨能力为 36 lp/mm。考虑到电子光学系统的放大倍率(0.4),对应阴极上中心空间分辨力为 14.4 lp/mm。图 7(b)为输出图像边缘的 MTF 曲线,利用上述方法可得到阴极上离中心 50 mm 处的空间分辨力为 11.2 lp/mm。

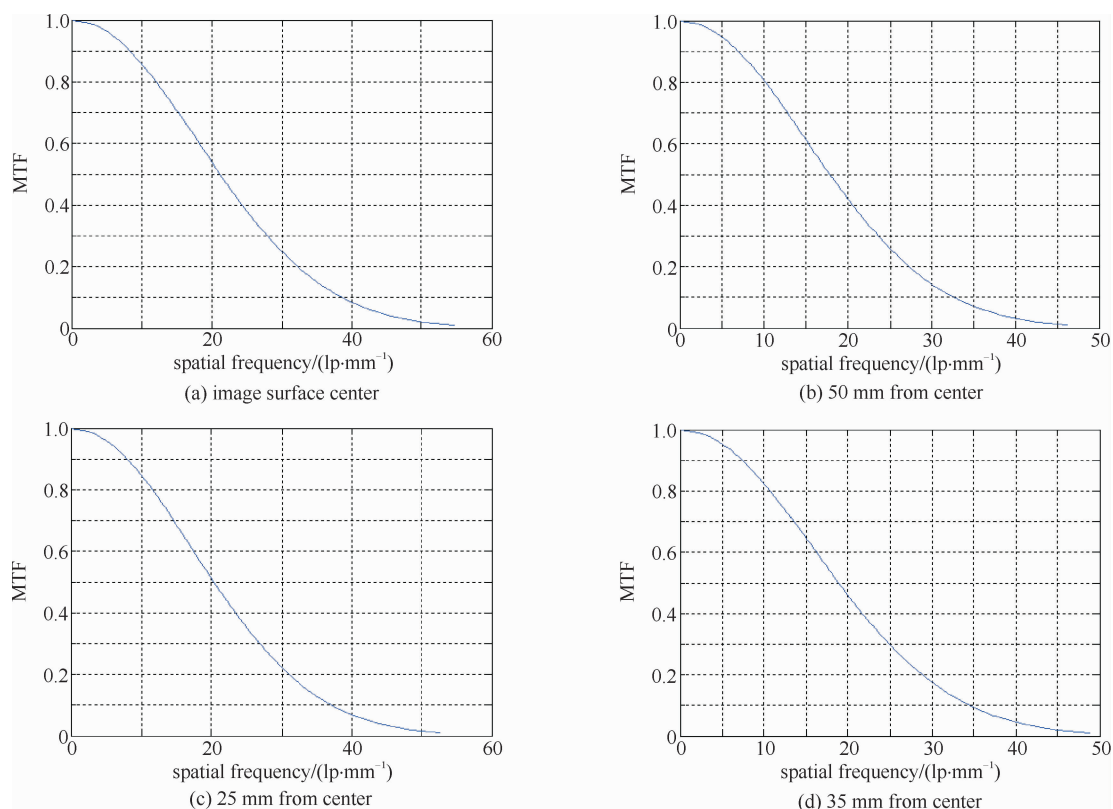


Fig. 7 MTF curve on image surface center and edge

图 7 输出图像中心及边缘的 MTF 曲线

### 3 结 论

本文提出了一种新的大面积分幅变像管系统,利用常规小面积选通 MCP 分幅管单元,实现了大面积分幅成像的目的,解决了大面积 MCP 增益均匀性难题。阴极有效面为  $\phi 100\text{ mm}$ ,空间分辨力达到  $14.4\text{ lp/mm}$ ,为研制大面积分幅相机提供了新的技术途径。所设计的大面积分幅实验样管的制作及实验测试验证工作正在进行之中。

### 参考文献:

- [1] 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. (Niu Lihong, Liu Jinyuan, Peng Wenda, et al. Micro channel plate gated X-ray nanosecond framing camera. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1274-1278)
- [2] 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. (Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu, et al. Gated MCP soft X-ray picosecond multi-framing camera. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 596-600)
- [3] Shan Bing, Chang Zenghu, Liu Jinyuan et al. MCP gated picosecond X-ray framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(5):449-456.
- [4] Siegmund O H, Kromer K E, Wurzel P, et al.  $6\text{ }\mu\text{m}$  pore microchannel plate detectors for the ROSETTA-RTOF experiment[C]//Proc of SPIE. 2000, **4140**:229-236.
- [5] Bradley D K, Bell P M, Landen O L, et al. Development and characterization of a pair of  $30\sim 40\text{ ps}$  X ray framing cameras[J]. *Scientific Instruments*, 1995, **66**(1): 716-718.
- [6] Bell P M, Kilkenney J D, Landen O L, et al. Multi-frame X ray imaging with a large area  $40\text{ ps}$  camera[J]. *Scientific Instruments*, 1991, **62**(12):2862-2870.
- [7] 袁铮,刘慎业,曹柱荣,等.门控分幅相机增益衰减特性[J]. 强激光与粒子束,2009, **21**(5):704-708. (Yuan Zheng, Liu Shenye, Cao Zhurong, et al. Gain attenuation of gated framing camera. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(5):704-708)
- [8] McCarville T, Fulkerson S, Booth R, et al. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**:103501.
- [9] 邓志成,杨勤劳.一种像增强器图像失真的校正方法[J]. 深圳大学学报:理工版,2006, **23**(3):258-262. (Deng Zhicheng, Yang Qinlao. A digital image approach to distortion correction of image intensifiers. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2006, **23**(3): 258-262)

## Design of large-format X-ray framing image tube

Zong Fangke, Yang Qinlao, Gu Li, Li Xiang, Zhang Jingjin

*(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education,*

*College of Optoelectronic and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)*

**Abstract:** An implementation method of large-format framing image tube is proposed. An electrostatic focusing image tube with large input photocathode and small output image is designed. Coupling with common small-format microchannel plate (MCP) gated framing unit, image gating and enhancement can be realized. Compared to the tube with large-format MCP, this kind of framing tube avoids the high manufacturing cost of large-format MCP and overcomes the transmission voltage loss and gain uniformity caused by long micro strips. The framing image tube has an effective input working diameter of 100 mm, an output image diameter of 40 mm, and a magnification of 0.4. The centre spatial resolution is 14.4 lp/mm, the marginal spatial resolution is 11.2 lp/mm, and the geometric distortion is less than 15%. The framing characteristic is determined by the MCP framing unit. This method is an effective way for expanding the work area of framing image tubes.

**Key words:** large-format; framing camera; gated microchannel plate; image tube; electro-optical devices