

# 微通道板对软X射线响应的实验研究

余永正 杨晓文 丁义山 檀慧明

**摘要:** 在X光成像望远镜中微通道板(MCP)作为焦平面上的成像接收器,探测天体的软X射线辐射图像。本文实验研究在软X射线波段MCP的成像性能以及与此有关的其他性能。作者设计了实验装置,测量了在碳K<sub>α</sub>(4.47nm)线下微通道板—荧光屏组件的分辨率,与计算结果进行了比较。提出了一种用软X射线光电发射作为初电流测量MCP电流增益的新方法,具有可反复多次测量、重复性良好及测量方便等优点。测量了在两个波长下微通道板的量子效率及随X射线入射角的变化。

## 一、引 言

近十几年来,X射线天文学已发展成为一门有丰富成果的天文学分支,它研究天体的X射线辐射。发射到外层空间的X光望远镜可以不受地球大气层吸收衰减直接接收天体的软X射线辐射,获得丰富的信息。成像接收可以获得更大的信息量。

在软X射线波段,MCP有一定的响应,因此可以作为在软X射线波段的成像探测器。它具有体积小、重量轻、功耗小、增益高、有良好的空间分辨率及能高速响应等优点。因此特别适合于空间应用。

微通道板与荧光屏近聚焦组成的组件可直接用于探测软X射线辐射图像。作者实验研究了国产和进口微通道板的软X射线成像性能,测量了在软X射线波段的量子效率并提出了一种基于软X射线光电发射的新的MCP增益测试方法。

## 二、实验装置

由于大气对软X射线吸收强烈,而且缺乏对软X射线高透过的密封窗材料,因此需将软X射线源和MCP置于同一真空系统。为使辐射光束近似平行地入射于MCP,要求源与MCP有足够间距。测试系统要求可拆卸,以方便地更换MCP和软X射线管靶材料。根据这些要求设计的测量装置示意图如图1所示。实际的测量装置如图2中的照片所示。真空系统用离子泵及涡轮分子泵抽气。测量时真空度为 $1\sim 5\times 10^{-6}$ Torr,软X射线源为Henke型X光管,更换不同的阳极靶材料,可得到不同波长的软X射线辐射。实验中采用碳靶,其特征谱线为C-K<sub>α</sub>线(4.47nm)。辐射中还有低背景连续谱。用正比计数管及512道脉冲高度分析仪测得的碳靶的辐射能谱如图3所示。靶焦斑为 $2\times 20\text{mm}^2$ 。光源出口处加有接地的铜网,接收逸漏的电子。光源距MCP1400mm。用专门研制的硅镂空分辨率卡作为测试卡。用光刻方法在硅片上刻出5、10、15、20、25  $\mu\text{m}$ 的镂空线条。为减小侧向腐蚀,Si片减薄至

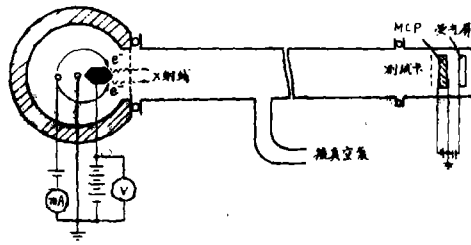


图1 微通道板成像性能测试装置示意图

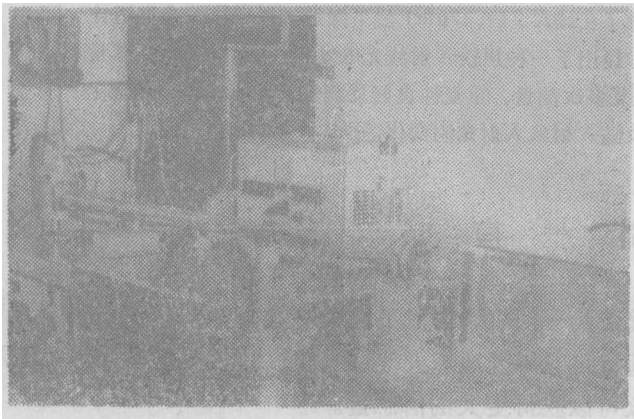


图2 微通道板性能测试装置

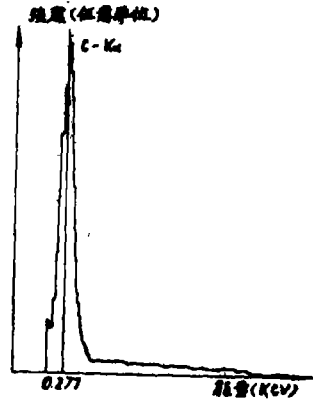


图3 碳靶的软X射线能谱

10 $\mu\text{m}$ 。测试卡距 MCP 输入面约3mm。实验用 MCP 为长春光机学院研制及美国 Galileo Ele. Opt. Cor生产的6025型MCP—荧光屏组件。其结构参数见表1。MCP—输出端与荧光屏为近贴聚焦结构。对光机学院板, MCP—荧光屏间距约 2mm, Galileo 组件则为 1.9 mm。荧光屏电压5kV, 输出荧光屏( $p=20$ )上的测试卡图像分辨率可直接目视读出。

测量MCP电流增益和暗电流时, 荧光屏作为接收极, 收集极电压500V, 用动电容静电计测量。

### 三、成像分辨率测量

对于碳K $\alpha$ 线, 用Galileo 6025组件, 在荧光屏上能清晰分辨10 lp/mm图形, 15 lp/mm可模糊辨认。测量时靶压4kV, 靶流20mA, MCP工作电压900V。

开口式单近贴聚焦MCP像增强器的图像调制传递函数(MTF)是MCP的 $MTF_1$ 、MCP输出端与荧光屏近贴聚焦电子光学结构的 $MTF_2$ 及荧光屏的 $MTF_3$ 的乘积。此外还需考虑荧光屏上反射电子的晕影及MCP饱和效应造成的使MTF下降的因素。

MCP的调制传递函数 $MTF_1$ 为<sup>[1]</sup>:

$$MTF_1 = \alpha \left| \frac{J_1(\alpha \pi f d)}{\alpha \pi f d} \right| \quad (1)$$

式中 $J_1$ 为一级Bessel函数,  $d$ 为通道直径( $\mu\text{m}$ ),  $f$ 为空间频率(lp/mm)由(1)式计算得出的

25 $\mu\text{m}$ 及12.5 $\mu\text{m}$ 的MCP的 $MTF_1$ 如图4所示。

表1 两种微通道板的结构参量

参数	MCP	
	Galileo 6025	长春光机学院
通道直径 [ $\mu\text{m}$ ]	25	12.5
通道中心距 [ $\mu\text{m}$ ]	32	16
开口面积比 [%]	55	55
有效直径 [mm]	25	28
通道板外径 [mm]	33	36
板厚度 [mm]	1.09	0.5
长径比	44	40
通道偏角	5°	13°

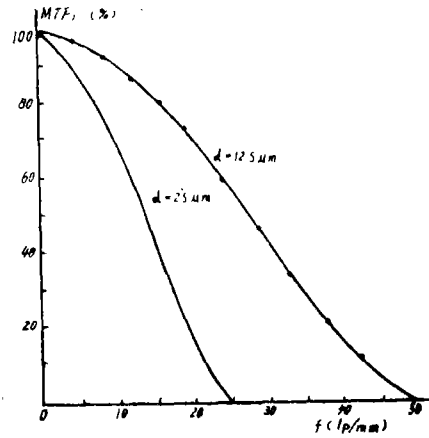


图4 两种通道直径MCP的 $MTF_1$

MCP与荧光屏近贴聚焦的电子光学系统的 $MTF_2$ 可类似于文献[1]中的分析进行计算。它与微通道板输出电子的能量分布及角度分布以及二者间距及所加电压有关。虽然MCP输出电子的能量较大和能量分布较宽，但由于分辨率主要取决于电子的横向速度，横向速度主要取决于出射电子的横向偏角。电子在通道内作抛物线运动并受通道直径限制，最大出射角较小，对 $MTF$ 的影响大大减小。与文献[1]中的分析类似，将实际的结构参数代入计算得到的 $MTF_2$ 如图5所示。

荧光屏的 $MTF_3$ 采用文献[1]中的数据。由于高能电子在荧光屏上反射而形成的晕影一般使 $MTF$ 值下降3—5%，微通道板饱和效应所致的 $MTF$ 下降一般为2%左右。由上述几项计算所得的 $MTF$ 如图6所示。Galileo 6025微通道板组件可观测到的极限分辨率应为略高

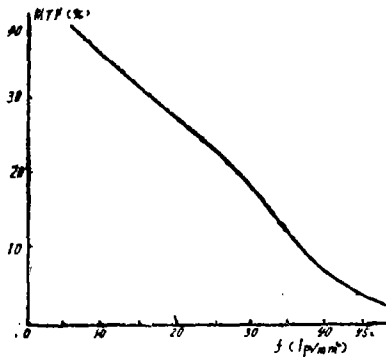


图5 微通道板输出端与荧光屏间近贴聚焦系统的 $MTF_2$

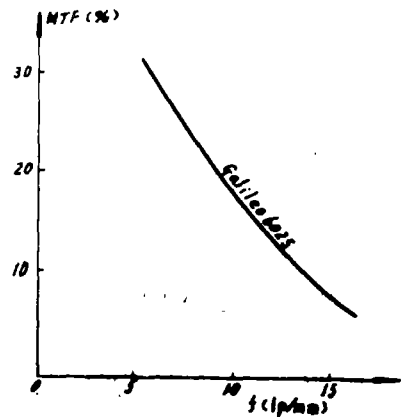


图6 单近贴聚焦MCP像增强器的 $MTF$ 曲线

于15 lp/mm。镂空测试卡仅有5、10、15、20、25 lp/mm几组图像，只能清晰地观测到10 lp/mm分辨率，15 lp/mm组图像较模糊。

上面仅考虑了成像器件的分辨率。由于光源的线尺寸( $s$ )为20mm，测试卡与MCP输入端间距( $c$ )为3mm。由此引起的半影宽度 $p$ 为<sup>(2)</sup>：

$$p = \frac{cs}{a-c} \quad (2)$$

式中 $a$ 为光源至MCP输入端间距, 将本实验装置中的有关数值代入可得:  $p = 0.04\text{mm}$ , 即相应于 $12.5\text{lp/mm}$ 实验中测得 $15\text{lp/mm}$ 组图像较模糊, 与上述分析吻合。

## 四、微通道板电流增益的测量

### 1. 实验测量方法

测量微通道板的电流增益时, 由于存在饱和效应<sup>[3]</sup>, 输入电流必须很小, 输出电流随输入电流的变化始落在线性区域。为使测量结果准确, 通常需使微通道板的输入电流密度 $<10^{-13}\text{A/cm}^2$ 。准确测量如此微弱的直流电流十分困难。静电计放大器往往有难以避免的零点漂移及强烈地受外界干扰等问题。

利用光电发射可提供测量MCP电流增益所需的输入电流。光电发射的特点是光电流与入射光强度在很宽的光强范围内呈线性关系。应用对可见光敏感的光阴极在实验测量上不方便。对可见光敏感的光阴极不能暴露于大气, 必须与待测的MCP在同一真空系统中制备, 制备光阴极时碱金属蒸汽可能污染MCP, 使其性能变坏。同时制备一次光阴极只能进行一次测量, 更换MCP时破坏真空将同时使光阴极失效。

对软X射线敏感的光阴极性能稳定, 可暴露于大气, 可在制备后移进测量装置, 可方便地用于测量MCP的电流增益。常用的软X射线光阴极是金膜。但金阴极光电灵敏度很低, 并且由于金阴极较薄(厚度大时透射光电灵敏度更低), 有相当一部分软X射线光子穿透金膜入射于MCP, 在其中直接产生光电响应, 将形成测量误差。同样的问题也存在于用紫外光激发金阴极测量MCP电流增益的方法中。这一问题原则上将难以解决。

作者利用对软X射线敏感的溴化铯光阴极的光电发射作为MCP输入电流。Henke等<sup>[4]</sup>发展的薄膜碘化铯光阴极在 $0.1\sim 10\text{keV}$ 光子能量区域内量子产额比金阴极高 $30\sim 100$ 倍。作者发展的溴化铯光阴极在 $4.47\text{nm}$ 处透射光电响应比碘化铯高约一倍<sup>[5]</sup>。溴化铯软X射线光阴极厚度约 $110\text{nm}$ , 入射的 $4.47\text{nm}$ 软X射线光子几乎全部被吸收, 无透射X光子直接激发MCP, 从而大大减小测量时误差并避免了采用金膜所产生的困难。

实验测量装置如图1所示。在MCP前放置一溴化铯透射型软X射线光阴极。光源与光阴极相距 $1400\text{mm}$ , 而光源线度仅为 $2\times 20\text{mm}$ , 因此入射于光阴极的软X射线光强较均匀。光阴极与MCP间距 $<1\text{mm}$ , 光阴极发射的光电流近贴聚焦输入至MCP。出射的电子流用荧光屏接收。软X射线光源靶电压恒定为 $4\text{kV}$ , 改变靶流可以大幅度地改变软X射线强度。靶流从 $1\mu\text{A}$ 变化至 $20\text{mA}$ , 软X射线强度可改变 $2\times 10^4$ 倍, 软X射线光电流也相应变化 $2\times 10^4$ 倍。

溴化铯光阴极制备于 $1\mu\text{m}$ 厚的聚丙烯薄膜上, 在聚丙烯薄膜上蒸以 $15\text{nm}$ 左右的铝膜作为电极。也曾采用以 $0.1\mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜作支撑膜及 $15\text{nm}$ 的铝膜作为电极, 在其上制备半透明溴化铯光阴极层。这两种衬底对碳K $\alpha$ 线的透过率分别测得为 $42\%$ 和 $30\%$ 。入射的软X射线光子穿透支撑层和电极, 在溴化铯光阴极中激发高能初光电子和低能次级电子, 逸出的电子绝大部分是低能次级电子。低能次级电子构成MCP输入电流, 光阴极与MCP间电压为 $300\sim 500\text{V}$ 。在大靶流时( $2\sim 20\text{mA}$ ), 用灵敏度为 $0.96\times 10^{-10}\text{A/mm}$ 的光点检流计测量光阴极发射电流。减小软X射线光源靶流时, 可相应地减小MCP的输入电流。

首先测定软X射线光源的靶流与软X射线强度（光子计数率）及光电发射的线性关系。测量装置与图1相同。在软X射线光阴极处改放一正比计数管。用长春光机所研制的SXR—2型封闭式正比计数管对光源发射的软X射线光子计数。软X射线光源与测量MCP电流增益时的运用条件一样，只是改变靶流。为使计数率不致饱和，正比计数管前置一小孔，小孔直径为 $20\mu\text{m}$ ，由于只需进行相对测量，正比计数管的窗口透过率、死时间、漏计数率等对测量的准确性和可靠性均无影响。测量结果见图7。由图可见，在测量范围内计数率与靶流呈良好的线性关系，表明在一定靶压下，Henke型软X射线光源在靶流 $<10\text{mA}$ 范围内，靶流与输出的软X射线光子数，即软X射线强度呈良好的线性关系。

然后实验测定溴化铯阴极光电发射与软X射线光源靶流的关系，以确定光阴极光电响应与软X射线强度的关系是否在线性范围。测量结果如图8所示。由图可见，在测量范围内光电流随靶流呈线性变化，光电流随靶流的变化呈正比关系。这一测量是在软X射线强度较大时进

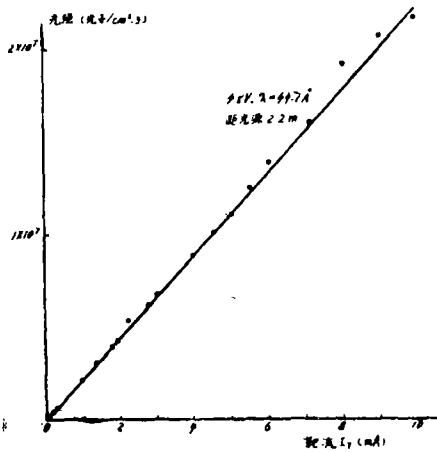


图7 软X射线光子计数率与光源靶流的关系曲线

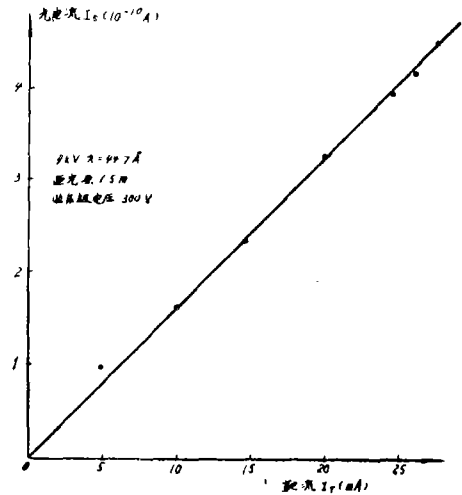


图8 溴化铯光电发射与软X射线光源靶流的关系

行的，显然，近伸至小靶流时这种正比关系将更严格地成立。因此在实验测量范围内（靶流从 $1\mu\text{A} \sim 20\text{mA}$ ）溴化铯阴极光电发射与靶流呈线性关系。测定在较大靶流（如 $5\text{mA}$ ）下溴化铯阴极的光电流可近伸至较小靶流时推算出相应的光电流数值。靶流数值可准确测定。为保证测量准确性，溴化铯光阴极面积小于MCP，确保光阴极发射的光电流完全为MCP所接收。

## 2. 测量结果及分析

应用作者提出的方法测试了表1所列的两种MCP。图9是两种MCP电流增益随MCP运用电压的变化，以输入电流作为参量。由图可见，对Galileo 6025板，在输入电流从 $6.02 \times 10^{-13}\text{A}$ 变化至 $4.81 \times 10^{-14}\text{A}$ 时，测得的增益G仅当其大于 $10^4$ 时始有较小差异。但当输入电流增大至 $6.02 \times 10^{-11}\text{A}$ 时，在 $G > 10^3$ 时，增益即明显下降，表明开始出现饱和效应而偏离线性区域，显然，此时测得的电流增益将比实际值偏小。图9的实测曲线也表明，在较高增益运用条件下，欲获得正确的测量结果，输入电流应低于 $1 \times 10^{-13}\text{A}$ ，不然测量结果将低于实际值。

图10是实测的两种MCP的电流传输特性曲线，以MCP的运用电压作为参量。随工作电压增大，G也增大，当输入电流 $>10^{-11}\text{A}$ 时，即使在较低工作电压下，电流传输特性也开始



图9 两种MCP电流增益随MCP运用电压的变化. 输入电流作为参量  
 1—6025  $4.81 \times 10^{-14}$  A  
 2—6025  $6.02 \times 10^{-13}$  A  
 3—6025  $6.02 \times 10^{-11}$  A  
 4— $\phi 55.9$  mm  $5 \times 10^{-12}$  A

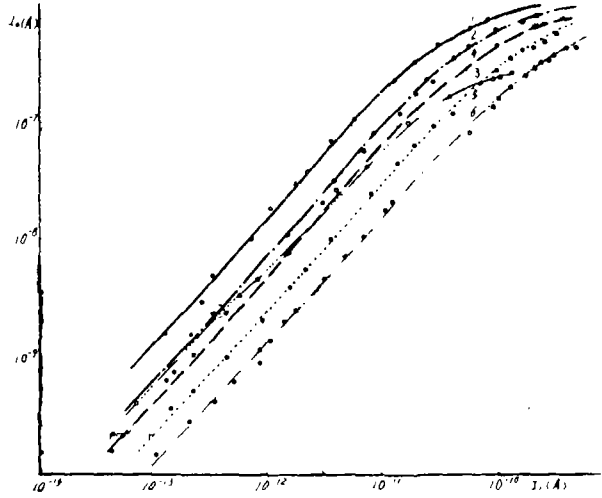


图10 两种MCP的电流传输特性曲线. MCP运用电压作为参量  
 1—6025  $V_M = 1200$  V 2—6025  
 $V_M = 1100$  V 3—6025  $V_M = 900$  V  
 4— $\phi 35.9$  mm  $V_M = 1000$  V  
 5— $\phi 35.9$  mm  $V_M = 900$  V  
 6— $\phi 35.9$  mm  $V_M = 800$  V

偏离线性, 而且随输入电流增大偏离线性的程度也增大, 此时输出电流  $> 10^{-7}$  A。实测的MCP电阻为  $10^8 \Omega$  左右, 运用电压为  $1000$  V 时, 通道壁的传导电流为  $10^{-5}$  A。一般, 当输出电流为传导电流的  $\sim 5\%$  时出现饱和现象。图10曲线表明, 当输出电流  $> 10^{-7}$  A 时, 电流传输特性曲线开始偏离线性, 与上述推论相一致。

图9和图10曲线形状和已发表的用其他方法测量的曲线形状及变化趋势相同, 测得的数值在合理范围内, 而且多次重复测量, 重复性良好, 没有零点漂移及外界干扰严重影响读数等问题。由于软X射线光源靶流与光子数及光电流的良好线性关系, 使测量结果准确可靠, 方法简便易行。

## 五、MCP在软X射线波段量子效率的测量

### 1. 实验测量方法

入射于MCP的软X射线光子数用SXR—II型正比计数管测量<sup>[6]</sup>, 只需考虑计数管窗材料、铝电极层及加固栅网透过率及计数管分辨时间所致的漏计数率的影响。在计数率小于  $10^4/s$  时, 漏计数率的影响可忽略不计。在MCP前加一厚度与计数管窗口相同的Mylar膜及铝电极层, 则计数管的计数率与入射于MCP的光子数之差仅为加固栅网的透过率。测定此透过率即可得出入射于MCP的软X射线光子数。

测量MCP接收软X射线光子后产生的电脉冲的电路方框图如图11所示。单块MCP增益较低, 信号易被噪声淹没, 其后放置第二块MCP, 用于对脉冲信号的放大。收集极收集的

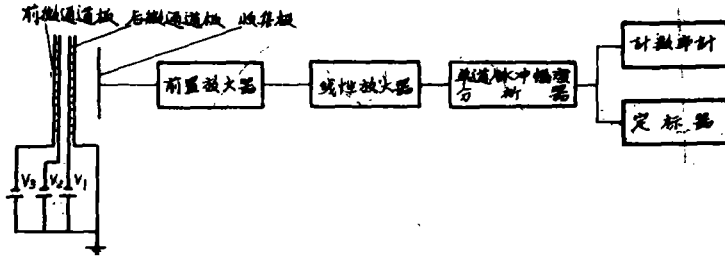


图11 测量MCP输出脉冲数的电路方框图

前微通道板工作电压  $V_{MCP1} = V_2 - V_3$

后微通道板工作电压  $V_{MCP2} = -V_1$

脉冲电荷经荷敏前置放大器预放并转换成电压信号，经线性放大器放大，输入单道脉冲幅度分析器，得出输出脉冲数。

实验测量在  $10^{-6}$  Torr 的高真空下进行。图12是微通道板组件及调节结构的外形图。图13为原理结构图。MCP和正比计数管前各放置一面积和形状相同的光阑，两光阑的通光口径相同。MCP前的光阑窗口上带有镀有铝膜的Mylar膜，厚度与正比计数管的窗膜相同。对碳  $K_{\alpha}$  线测量时，Mylar膜可作为滤光片。测量在铝  $K_{\alpha}$  线的量子效率时，在光路中另放一厚  $7.5\mu\text{m}$  的铝膜作为滤光片。微通道板组件可由在真空室外的磁力转动传动器调节，改变相对于入射软X射线的入射角。当微通道板转动  $90^\circ$  时，软X射线直接入射于正比计数管，可直接测量入射光子数。

## 2. 测量结果

图14是偏向角为  $13^\circ$  的微通道板对  $4.47\text{nm}$  软X射线的量子效率，角度坐标是入射软X射

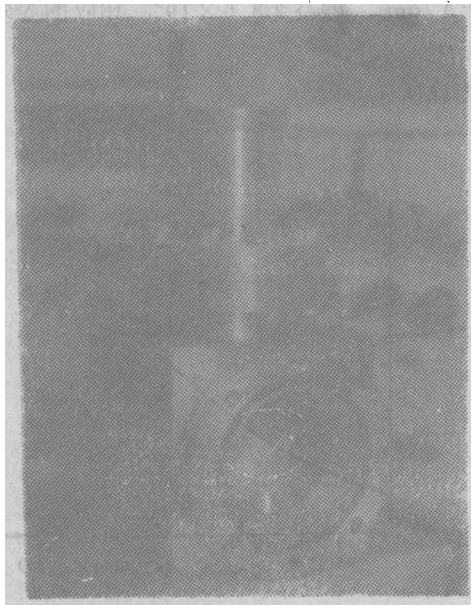


图12 MCP室外形图

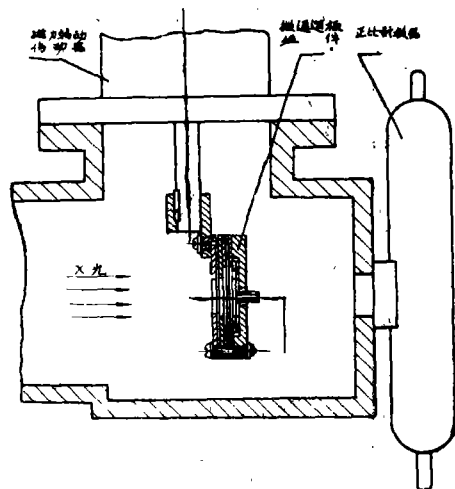


图13 MCP组件及测量装置结构图

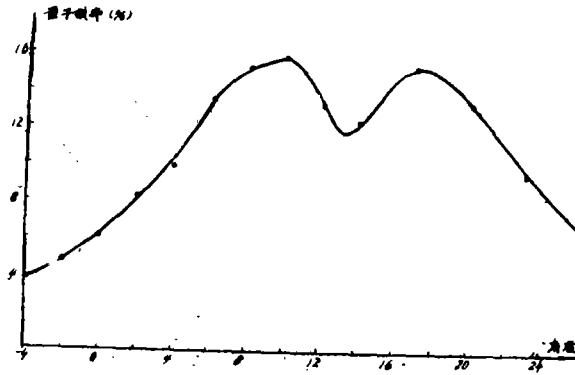


图14 偏向角为13°的微通道板对4.47nm的量子效率随角度的变化

线相对于MCP法线的夹角。图15是偏向角为0°的微通道板在4.47nm和0.83nm两个波长下微通道板量子效率随入射角的变化。

由图可见，对偏向角为13°的MCP，入射软X射线与通道板法线夹角为8°~10°及16°~18°时，量子效率达峰值。对偏向角为0°的微通道板，入射光线与通道板法线夹角约5°—7°时，对4.47nm辐射，量子效率达峰值，而对0.83nm则在1°—3°时量子效率达峰值。

## 六、暗 电 流

由于太阳冕洞、大尺寸区域软X射线强度较弱，探测时需考虑MCP的暗电流。MCP暗电流是微通道板在运用电压下无软X射线及其他激发源时微通道板出射的电子流密度。对Galileo 6025MCP，板两端电压为1000V时，暗电流密度 $<1.24 \times 10^{-12} \text{A/cm}^2$ ，此时板电流增益为 $1.85 \times 10^4$ ，故等效输入噪声电流为 $1.24 \times 10^{-12} / 1.85 \times 10^4 = 6.70 \times 10^{-17} \text{A/cm}^2$ ，测量的国产微通道板在900V时暗电流为 $2.7 \times 10^{-12} \text{A/cm}^2$ ，增益为 $8.6 \times 10^3$ ，相应的等效输入噪声电流为 $3.14 \times 10^{-16} \text{A/cm}^2$ ，比Galileo MCP约高5倍。

国产MCP暗电流随MCP运用电压的变化如图16所示。

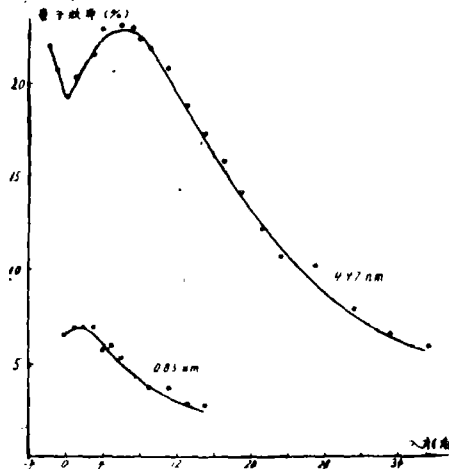


图15 偏向角为0°的微通道板在4.47nm及0.83nm下的量子效率随角度的变化

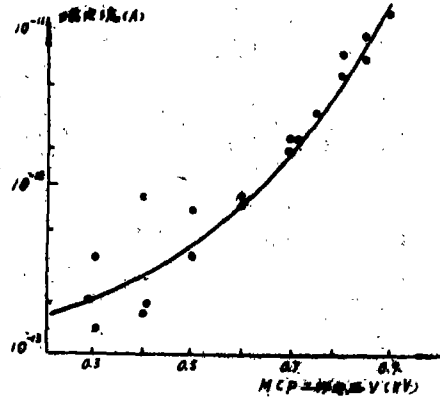


图16 国产MCP暗电流与运用电压的关系

## 七、结 语

作者实验测试了微通道板对软 $X$ 射线响应的各项性能。实测的微通道板与荧光屏近贴聚焦的组件对软 $X$ 射线成像的极限分辨率与计算相符。提出了一种用软 $X$ 射线光电发射作为初电流测量 $MCP$ 电流增益的新方法,具有可反复多次测量、重复性良好及测量方便等优点,可推广用于对微通道板性能的测试。测量了在两个波长下 $MCP$ 的量子效率随软 $X$ 射线入射角的变化,所得数据与国外发表的相近。

实验测量所用的Henke型软 $X$ 射线光源及正比计数管由杨名恪、崔松鹤同志提供,在此谨表谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] I. P. Csorba, *Electro-Optics Sys. Des. Conf.*, 1976, 646.
- [2] V. E. Cosslett, W. C. Nixon, *X-Ray Microscopy*. Cambridge University 1960.
- [3] C. Loty, *Acta Electronica*, 1971, 14, 107.
- [4] B. L. Henke et al., *J. Appl. Phys.*, 1981, 52, 1509.
- [5] She Yongzheng, Yang Xiaowen, Ding Yishan, *Adv Electronics and Electron Phys.*, 1985, 64B, 541.
- [6] 杨名恪, *光学机械* 1984, 1, 24.

## Experimental Research on the Performances of Microchannel Plate in Soft X-ray Region

She Yongzheng Yang Xiaowen Ding Yishan Tan Huiming

### Abstract

Microchannel plate (MCP) may be used as an imaging detector at the focal plane of a X-ray telescope which is usually responded to irradiation of the celestial body in soft X-ray region. The imaging performance and other related performances of the MCP in soft X-ray region has been measured experimentally. The resolution of MCP-screen proximity focus system has been measured at 4.47nm and compared with the calculating result. A new method for measurement of the electron gain of the MCP which uses the soft X-ray photoemission as a primary electron source has been proposed. The advantages of this new method are the measurement can be repeated many times with one photocathode, the results accurate and well repeatable, the measurement process is convenient. The quantum efficiency of the MCP as a function of the incident angle at two wavelengths has been measured.