

# 一台高计数率 GEM X 射线成像装置原型\*

李澄<sup>1)</sup> 孙勇杰 周意 安少辉 许咨宗

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

**摘要** 研制一种新型的三层级联倍增 GEM 气体探测器,其有效增益达到  $10^5$ ,用于高亮度 X 射线成像.设计和制作了精密的微条读出和信号引出方法,采用高速 SCSI 接口的机箱控制器及计算机控制系统,用于该探测器的射线定位测量,在此基础上建立了一台 GEM-X 射线成像装置原型.实验结果显示:在 X 射线强度为  $10^5 \text{ Hz/mm}^2$ ,其增益稳定性  $< 1\%$ ,位置分辨  $< 100 \mu\text{m}$ ,并获得了清晰的两维图像.

**关键词** GEM 探测器 高计数率 X 射线成像

## 1 引言

近年来许多实验室正在研究和发展具有高计数率能力和高位置分辨的 GEM(Gas Electron Multiplier)探测器,以满足新的高能物理实验的需要<sup>[1-3]</sup>.典型的 GEM 电极结构是在两边镀铜的 Kapton 薄膜上,用化学蚀刻方法将其制成许多等间隔的小孔.孔的中心部分直径在  $50-70 \mu\text{m}$ ,加上电压后,孔中心的电场强度可以达到  $10^4 \text{ V/cm}$  以上.当电子在电场加速作用下经过小孔时与气体分子发生碰撞和电离产生多个次级电子,并通过气体雪崩放大过程,实现对原初电子的倍增.图 1 是使用计算机软件(Garfield/CERN V7.3)模拟单个电子在 GEM 电极中的雪崩放大的图像.

一般单层 GEM 电极可以把原初电离放大  $10^2-10^3$  倍,使用两层 GEM 电极的气体放大倍数可以达到  $10^4$  以上,配合微型电极条读出,可以制作成多种结构的不对称型气体探测器.其优点是:它不用通常的金属丝布局来构成电场区(如多丝正比室,时间投影室)可以有效减小气隙以提高探测器的时间响应;由于雪崩放大过程和电子与离子收集过程是分开进行,可以有效减小空间电荷效应,提高探测器的

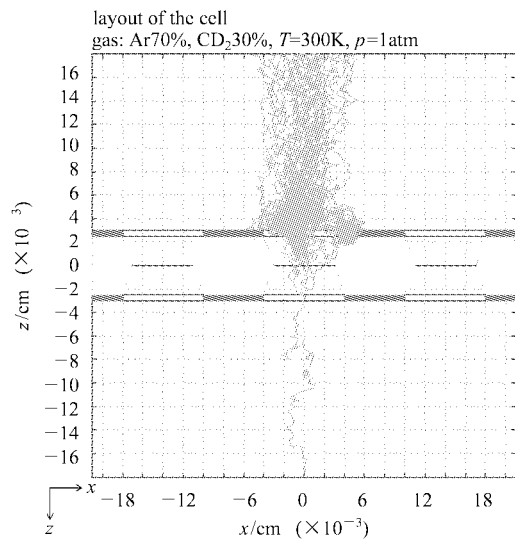


图 1 电子在 GEM 探测器中的雪崩放大图像  
Viewing plane:  $y = 0$

计数能力;由于雪崩放大过程被局限在微孔内,采用微条电极读出可以获得更高的位置分辨.之外,GEM 质量轻,可以加工成较大的尺寸和各种形状,并且价格便宜.这些特点,使得 GEM 探测器不仅是一种独具特色的新型粒子径迹探测器,同时也将是

2004-05-08 收稿

\* 国家自然科学基金(10075045)资助

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

高亮度同步辐射光源实验,医用 CT 诊断,X 射线晶体学等领域很具潜力的成像探测器.为此,我们设计和制作了一台三层 GEM 级联倍增 X 射线成像装置,使用高亮度铜靶 X 射线管测量了该装置各方面性能,获得了高分辨 X 射线成像.

## 2 三级倍增 GEM 探测器

实验使用的 GEM 电极的几何构型见图 2.采用有限元算法和电场模拟程序(3D Maxwell),对其电场分布模拟和计算的结果显示<sup>[4]</sup>:当 GEM 极间电压在 400V 以上时,该几何构型的 GEM 孔内场强都在  $10^5$  V/cm 以上(见图 3),足以产生电子雪崩放大.实验制作的三层级联倍增的 GEM 探测器结构见图 4.除 GEM 孔内雪崩放大区外,按照电子漂移运动过程可分为漂移区,传输区 1,传输区 2 和传输区 3.读出电极是由 0.5mm 厚的双面印刷线路板构成,条宽度

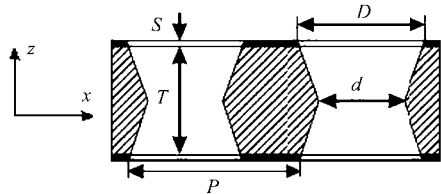


图 2 标准 GEM 电极的几何尺寸  
 $S = 5\mu\text{m}$ ,  $T = 50\mu\text{m}$ ,  $D = 70\mu\text{m}$ ,  $d = 60\mu\text{m}$ ,  $P = 140\mu\text{m}$ .

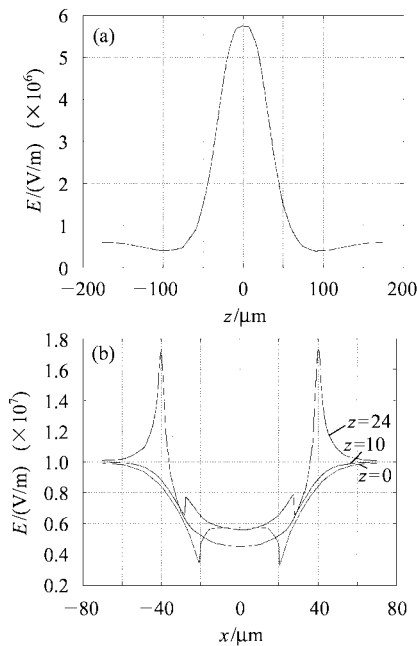


图 3 GEM 电场分布  
 (a)沿孔的纵向;(b)沿孔的横向.

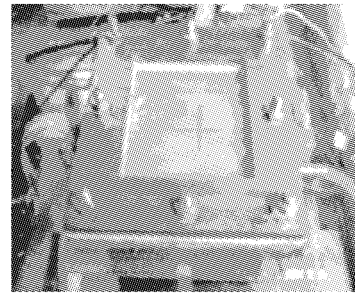
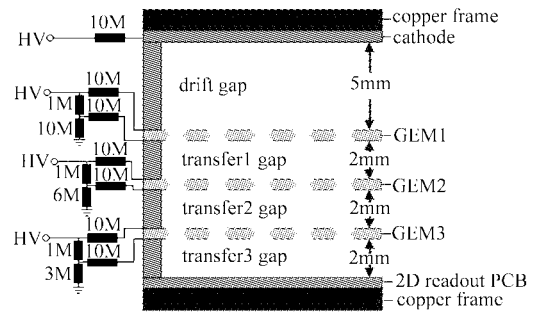


图 4 三层 GEM 探测器结构和照片

分别取  $0.35\text{mm}$  ( $x$  方向)和  $0.65\text{mm}$  ( $y$  方向),以保证具有相近的有效电荷收集面积.当电子达到上电极面时,通过电容耦合,下电极面上同时有感应信号.工作时每个 GEM 电极使用独立供电方式,使用工作气体比例为  $70\% \text{ Ar} + 30\% \text{ CO}_2$ ,各个区间电场强度比分别为  $1:2.5:4.5:6$  (kV/cm),有效气体放大倍数为  $2 \times 10^5$ .

图 5 是实验使用的 X 射线管(型号 XTF5011,最大强度为  $5 \times 10^5 \text{ Hz/mm}^2$ )工作在不同灯丝电流,探测器有效增益达到  $5 \times 10^5$  时,测量的铜靶 X 射线谱.由测量的峰位随 X 射线强度的变化,计算得到

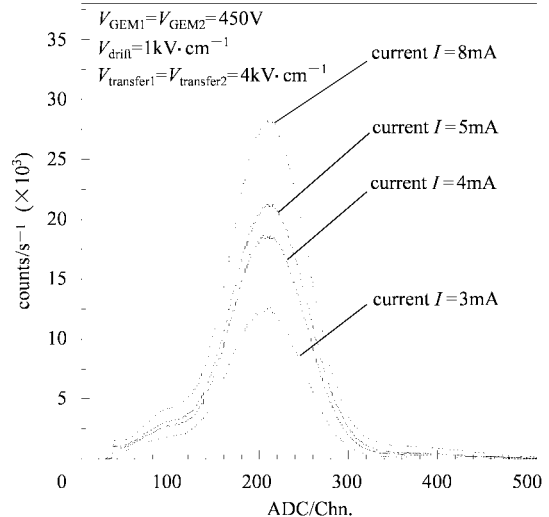


图 5 铜靶的 X 射线谱

其增益变化小于 1% (见图 6).

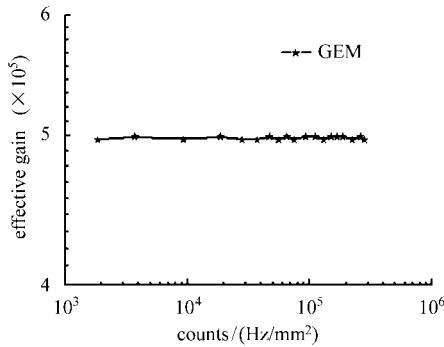


图 6 测量的峰位随 X 射线强度的变化

### 3 高计数率数据获取系统

为了适应高计数率测量的要求,实验采用一种支持 SCSI 总线接口的 CAMAC 机箱控制器 (Jorway Model-73A) 和虚拟仪器编程软件 LabVIEW 实现计算机在线系统的数据获取. 该控制器内部有一个高速缓冲器,可以使控制器在执行数据获取操作的同时,进行数据传输到计算机的操作,使得使用系统的数据获取效率大大提高,其数据读取周期为 400ns, 24bit 的数据传输速率可达 7.5MB/s<sup>[5]</sup>.

为了适应高精度定位测量的要求,数据获取系统采用重心定位读出方法. 整个 X 射线成像系统见图 7. GEM 探测器输出信号经电荷灵敏放大器 (自制,灵敏度为 0.8V/pC), 成形放大器 (自制,成形时间  $RC = CR = 30\text{ns}$ ), 送到 ADC (LRS2249W). 门信号取自 GEM3 下电极,它是由 GEM 电极收集正离子 (或离子反馈) 产生的信号,经倒相和放大甄别后作为 ADC 开门信号.

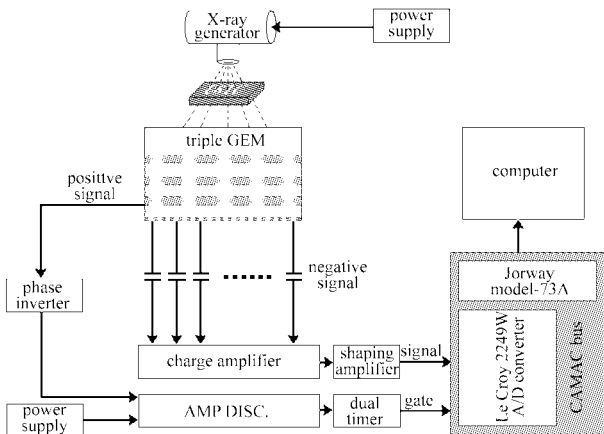


图 7 GEM-X 射线成像系统

### 4 X 射线成像实验结果

为了测定系统的定位精度,实验使用铜靶 X 射线管,对 0.2mm 宽双缝 (间距 0.2mm) 铝准直器进行测量. 由于准直器缝深度 (30mm) 远大于缝宽度,可近似认为入射 X 射线是平行束. 在电荷重心计算时,  $x$  和  $y$  方向各取 6 路读出条信号. 图 8 是单次测量的  $x$  和  $y$  方向电荷分布. 图 9(a) 是缝宽沿  $x$  方向上的测量结果. 对双缝位置分布使用高斯拟合得到的半高全宽度 (FWHM) 为 0.276mm, 扣除缝宽度的影响,  $x$  方向上定位精度为  $\sigma = 79\mu\text{m}$ . 将缝宽沿  $y$  方向上放置测量获得  $y$  方向上的位置分辨为  $86\mu\text{m}$ . 图 9(b) 是直接对“USTC”四字所成的灰度图像,测量时间 10 分钟,整个图形未加任何处理. 图中的亮点是由于 GEM 探测器局部放电信号,导致  $x$  方向的个别路放大器饱和造成的. 图 9(a) 中,两条缝所成图像灰度有少量差异,是由于两条缝相对准直孔的位置有些差异造成,而非饱和造成. 因为两条缝的灰度差异要远远小于图 9(b) 中亮点与平均灰度的差异.

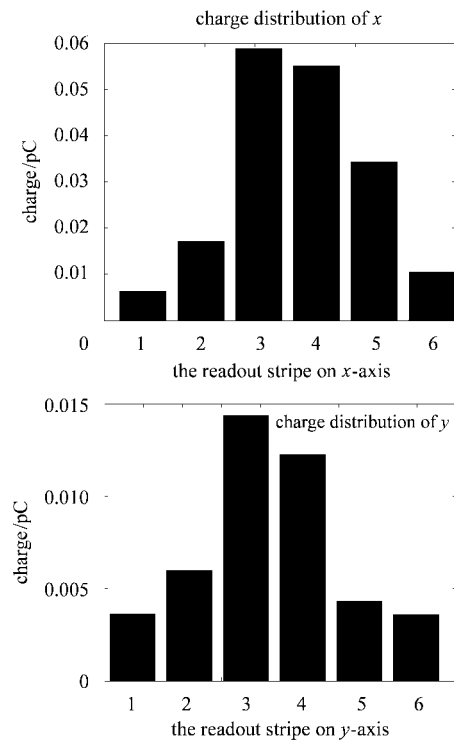


图 8 测量的  $x$  和  $y$  方向电荷分布

### 5 结论

由三级级联倍增 GEM 气体探测器和高速数据

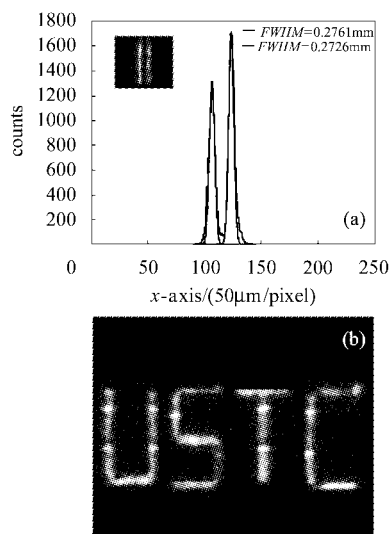


图 9  $x$  方向双缝(a)和字“USTC”(b)的灰度图像

获取系统构成一台 GEM-X 成像装置原型, 在 X 射线强度为  $10^5 \text{ Hz/mm}^2$ , 可以在短时间内获得了清晰的实时图像. 整个系统的位置分辨小于  $90 \mu\text{m}$ , 并具有良好的稳定, 显示了 GEM-X 射线探测器具有的高灵敏度和快时间响应的特点. 利用这一特点, 在医学影像诊断中(如 X-CT), 不仅可以获高分辨的图像, 而且使病人受到的辐照剂量大大减小, 具有广泛

的应用前景. 在生物学研究中, X 射线晶体衍射方法是目前研究人体复杂分子结构的最有效的手段之一, 根据 DNA 的衍射资料和相关生化数据, 曾提出了 DNA 的双螺旋分子结构, 但是, 深入的研究 DNA 大分子及其基因的三维结构需要很强的 X 光源(如: 第三代同步辐射光源)才能获得足够的衍射信号, 同时为了观测活体还必须快速, 否则生物体很快就会死亡, 而利用 GEM 技术研制的高计数率位置灵敏探测器完全可能满足这些实验要求. 我们的研究为拓展 GEM 探测器在其他研究领域的应用提供了有价值的实验结果. 图 10 是整个测量系统的照片.



图 10

作者感谢欧洲粒子物理研究中心 F. Sauli 教授提供 GEM 测试样品及有关研究资料, 对本项目的研究给予了重要的帮助.

## 参考文献 (References)

- Sauli F. Nucl. Instrum. Methodr, 1997, **A386**: 531
- Sauli F. Nucl. Instrum. Methodr, 2003, **A505**: 195
- Bachmann S, Bressan A et al. Nucl. Instrum. Methodr, 1999, **A438**: 376
- ZHOU Yi, LI Cheng et al. HEP&NP, 2004, **28**(3):299(in Chinese)  
(周意, 李澄等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(3):299)
- SUN Yong-Jie, LI Cheng et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**(1):19(in Chinese)  
(孙勇杰, 李澄等. 核电子学与探测技术, 2004, **24**(1):19)

## A Prototype of X-Ray Imaging Device Based on the GEM Detector

LI Cheng<sup>1)</sup> SUN Yong-Jie ZHOU Yi AN Shao-Hui XU Zi-Zong

(Dept of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** A prototype of X-ray imaging device based on triple Gas Electron Multiply detector is studied, which has an effective gain up to  $10^5$  and can be used in high rate X-rays imaging. The precise method of micro-strip readout is designed for X-rays localization, and the crate controller of high-speed SCSI interface is applied for the data acquisition. The test results show that the position resolution of measurement system is less than  $90 \mu\text{m}$  and the stability of its effective gain is better than 1% under the X-ray flux of  $10^5 \text{ Hz/mm}^2$ .

**Key words** GEM detector, high rate, X-ray imaging

Received 8 May 2004

\* Supported by NSFC(10075045)

1)E-mail:licheng@ustc.edu.cn