

# 基于读出条读出的二维位置灵敏气体 电子倍增器的研制

董 静 吕新宇 刘 贲<sup>†</sup> 刘荣光 马晓妍 王 岚 陈元柏 欧阳群 谢一冈

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2009 年 9 月 15 日收到; 2009 年 10 月 9 日收到修改稿)

为研发能够满足北京同步辐射 (BSRF) 实验要求的二维探测器, 研制了基于读出条读出的二维位置灵敏 X 射线气体电子倍增器 (GEM). 实验过程中通过改进读出条的周期, 并基于中科院高能所实验物理中心电子学组研制的多路电荷放大器系统与 VME 存储-ADC 系统, 对软 X 射线源的位置分辨率进行了精密测量且得到了优异的二维位置分辨: X 方向约为  $84 \mu\text{m}$ , Y 方向约为  $75 \mu\text{m}$ . 研究了三级 GEM 压差之和对位置分辨的影响, 并测试了探测器的位置准确度与线性. 对基于阳极读出的 GEM 用于模拟读出测试系统得到了一定的理论认识, 侧重研究了 GEM 探测器基于模拟读出的系统特性, 给出了相关的分析与讨论.

**关键词:** 读出条, 气体电子倍增器, 位置分辨, 模拟读出

**PACC:** 2940T, 2940H

## 1. 引 言

气体电子倍增器<sup>[1]</sup> (gas electron multiplier, GEM) 是近几年由欧洲核子研究中心 (CERN) 发展起来的一种新型位置灵敏型气体探测器, 其基本部件是两面敷铜且在其上蚀刻出大量微孔的聚酰亚胺 (kapton) 膜. 工作时在两侧铜面上加高电压, 电子在孔内雪崩, 对原初电离进行放大. 该探测器具有一系列优点, 如高计数率、抗辐射、质量轻、高空间及时间分辨、读出方便, 与不同转换体连用可探测不同射线等, 自 1997 年发明至今, 已经广泛的应用在 高能物理与粒子物理及成像等诸多方面. 国内已有研究者做相关研究, 本工作所在实验室已开展了此课题研究<sup>[2]</sup>.

针对北京同步辐射 (BSRF) 实验对二维探测器的实际需求, 研发能够满足实验要求的二维位置灵敏 X 射线气体电子倍增器是中国科学院重大科研装备研制项目.

为了深入了解 GEM 的特性, 得到足够高的定位精度, 设计制作了基于二维读出条模拟读出的 GEM 模型. 另设计加工一套配有高精度拉力传感器的拉伸装置. 通过基于两种读出条周期读出的模型实

验, 设计了合理的 GEM 探测器读出条结构和 GEM 模拟读出的自触发方式. 经测试得到了优异的二维位置分辨; 研究了三级 GEM 压差之和对位置分辨的影响; 测试了探测器的位置准确度与线性; 并对基于阳极读出的 GEM 用于模拟读出测试系统得到了一定的理论认识.

## 2. 用于二维位置灵敏探测的 GEM 探测器的制作及实验装置

### 2.1. 二维位置灵敏 GEM 探测器的结构安排

利用有效面积为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的 CERN 标准膜组装三级 GEM. GEM 膜由配有高精度拉力传感器的拉伸装置 (图 1) 拉制而成, 阴极是经过上述精细拉伸等工艺处理的有效面积为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的单面覆铜 ( $5 \mu\text{m}$ ) 聚酰亚胺薄膜 ( $50 \mu\text{m}$ ). 读出级为印刷线路板. 图 2 为三级 GEM 的结构示意, 漂移区、第一、第二传输区、收集区间隙分别为  $8 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ cm}$ . 利用型号为 CAEN SY-127 高压电源供给高压. 阴极、三层 GEM 膜及 pad 读出板密封在室体中, 充以工作气体 ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (70:30)), 采用一个大气压流气式供气.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: liuben@ihep.ac.cn

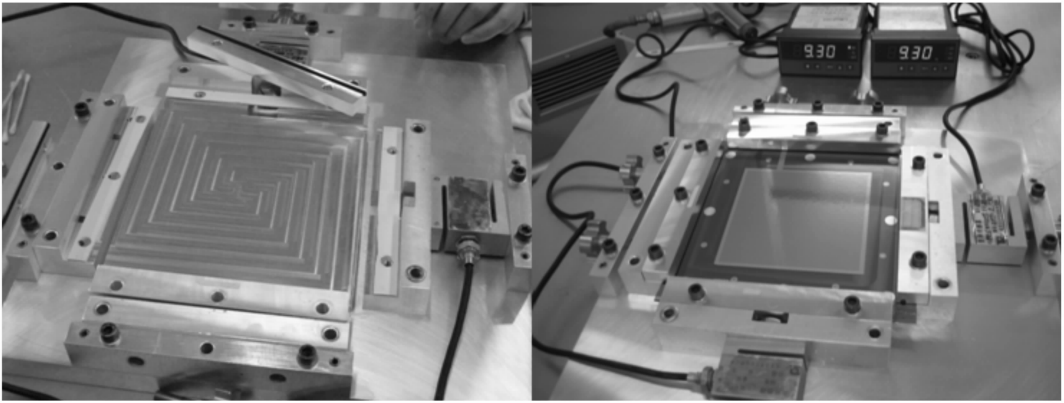


图 1 配置拉力传感器的 GEM 膜拉伸装置的示意图

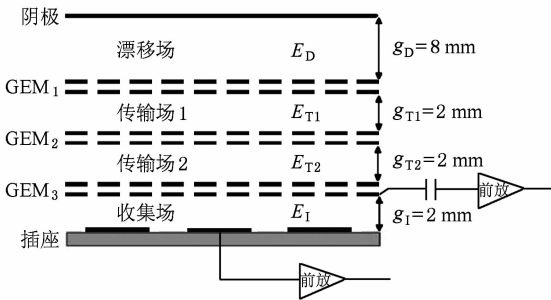


图 2 三级 GEM 的结构示意图 ( $E_D$ ,  $E_{T1}$ ,  $E_{T2}$ ,  $E_1$  分别为漂移场、第一传输场、第二传输场和收集场;  $g_D$ ,  $g_{T1}$ ,  $g_{T2}$  和  $g_1$  分别为各场的间隙)

### 2.2. 二维位置灵敏 GEM 探测器的读出结构

二维位置灵敏 GEM 探测器的基本定位思想是

通过测量读出平面感应电荷分布的重心来确定雪崩的发生位置. 因此, 读出电子学系统要记录雪崩发生后每根读出条上的感应信号电荷的大小. 以第三层 GEM 下表面信号作为触发信号, 测量读出平面的电荷大小, 就可以得到该次雪崩对应的读出平面的感应电荷的分布. 通过计算分布的重心就可以得到雪崩的发生位置.

读出采用一个感应平面二维读出的方式, 如图 3 所示. 其中, 读出条为读出  $X$ ; 小 pad 内部横向相连, 为  $Y$  读出. 本实验中采用了两种周期结构的二维读出条, 分别为 (周期)  $4\text{ mm}$  ( $2.2\text{ mm}$ ) 和  $2\text{ mm}$  ( $0.2\text{ mm}$ ),  $0.457\text{ mm}$  ( $0.559\text{ mm}$ ) 和  $0.752\text{ mm}$  ( $0.102\text{ mm}$ ), 其中, 括号中的数字代表该周期中的间隙. 对于两种周期结构, 各自共需要 75 路和 352 路电子学系统. 电子学和数据获取系统采用了中科

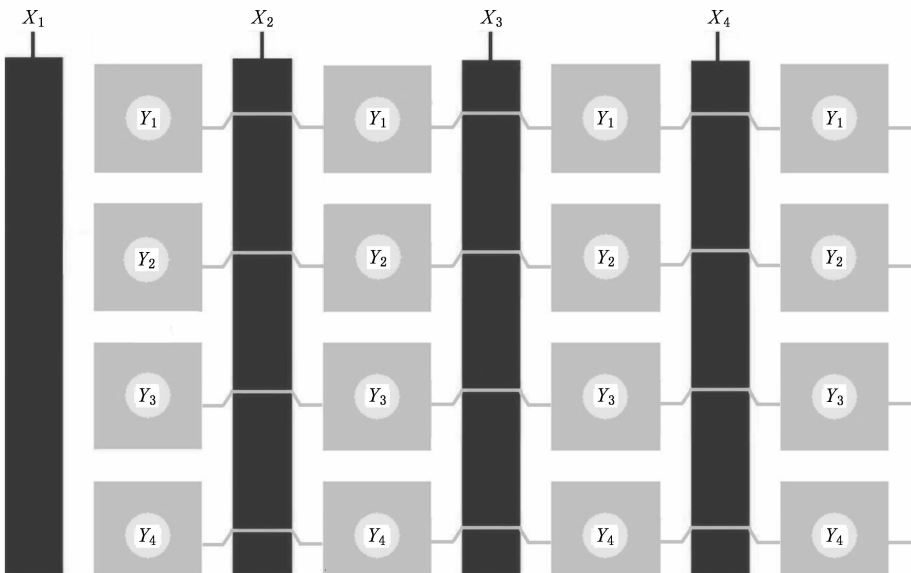


图 3 二维读出条示意图

院高能所实验物理中心电子学组和数据获取组研制的多路电荷放大器系统、VME 存储-ADC 系统与基于 VisualC++ 6.0 和 Labview8.2 的数据获取系统. 初期实验  $X, Y$  方向分别连接 16 路电子学系统.

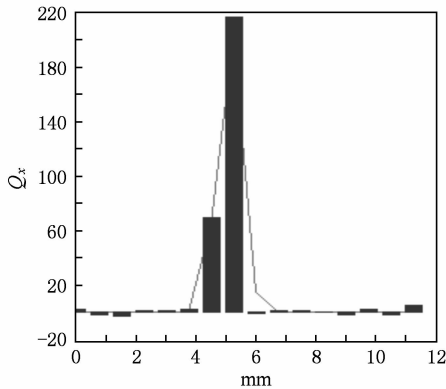
### 3. 实验结果

#### 3.1. 信号时间特性

当测试读出条信号特征时, 各级电场及高压分别设置为  $\Delta V_{G1} = 380 \text{ V}$ ,  $\Delta V_{G2} = 360 \text{ V}$ ,  $\Delta V_{G3} = 340 \text{ V}$ ,  $E_D = 3 \text{ kV/cm}$ ,  $E_1 = E_{T1} = E_{T2} = 2 \text{ kV/cm}$ . 此时, 增益可达  $10^4$ . 将读出条信号与电流灵敏前置放大器<sup>a)</sup>连接, 电流前放的输出信号即可反映 GEM 探测器的读出条信号. 采用第一种周期的读出条时, 信号的时间特性为: 上升时间 25—40 ns; 下降时间 60—90 ns. 采用第二种周期的读出条时, 上升时间约为 20 ns; 下降时间约为 30 ns. 另外测试得到第二种周期结构的相邻通道之间的串扰不超过 10%.

#### 3.2. 位置分辨的测量

位置分辨率测试是探测器最为重要的指标之



一. 位置分辨率的好坏是检验二维位置灵敏 X 射线 GEM 探测器的设计成功与否的关键.

实验测得, 当采用第一种读出条周期时, 大多数事例只在一个读出条上面有感应信号, 说明此读出条的周期间隙过大, 应该减少读出条的周期间隙才能用重心法测试位置分辨. 因此采用第二种读出条周期, 以下结果基于此周期结构得到.

##### 3.2.1. 读出平面感应信号的分布

让  $^{55}\text{Fe}$  59 keV X 射线经过一个准直缝宽为 0.3 mm, 长 7 mm, 深 30 mm 的准直器(此准直器放在一个厚 2 mm 的铝架上以免直接接触 GEM 窗), 通过测量 X 射线经过准直缝后的分布宽度就可以得到探测器的位置分辨率.

对  $^{55}\text{Fe}$  5.9 keV X 射线经过准直缝入射的读出平面感应信号的分布进行了测试. 图 4 为读出条  $X$  方向典型的信号分布, 其中, 所有读出数据已经先减去了电子学基线. 结果表明, 一般有 2 根读出条上有信号, 少数情况下有 1 根读出条上有信号. 对分布进行高斯拟合, 可以得到信号分布的半高宽大约为 0.90 mm. 拟合的峰值大约在 100—300 之间. 图 5 为读出条  $Y$  方向典型的信号分布, 一般有 3—5 根读出条上有信号.

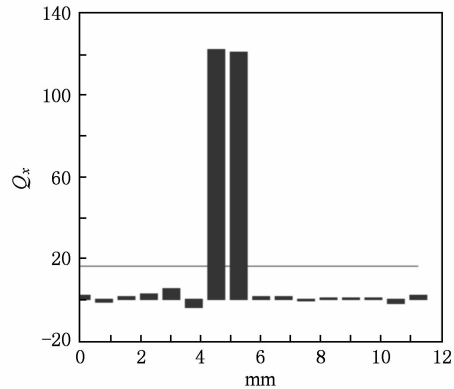


图 4 读出条  $X$  方向典型的信号分布

对分布进行高斯拟合, 可以得到信号分布的半高宽大约为 0.88 mm. 拟合的峰值大约在 200—300 之间.

在分析数据时, 将读出平面信号的大小及分布宽度作为判断是否是 X 射线信号的依据. 即, 对于  $X$  读出平面和  $Y$  读出平面的数据, 只有当对其进行高斯拟合的半高宽小于 1, 同时高斯拟合的峰值大于

30 时, 才认为这是 X 射线产生的信号.

##### 3.2.2. 位置分辨率

将读出电子学系统安装在二维位置灵敏 GEM 探测器上后, 对模型  $X, Y$  方向的位置分辨率进行了测试, 在测试模型沿着  $X$  方向的位置分辨率时, 准直缝的方向与  $X$  方向平行, 测量得到  $^{55}\text{Fe}$  X 射线经过准直缝后的分布宽度如图 6 所示, 分布的 FWHM

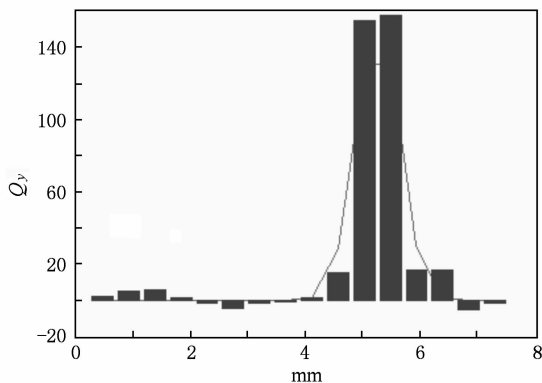


图5 读出条 Y 方向典型的信号分布

为 0.210 mm, 计算得标准偏差为 0.085 mm. 在测试模型沿着 Y 方向的位置分辨率时, 准直缝的方向与 Y 方向平行, 测量得到  $^{55}\text{Fe}$  X 射线经过准直缝后的分布宽度如图 7 所示, 分布的 FWHM 为 0.180 mm, 计算得标准偏差为 0.077 mm. 此分布不是很对称, 估计是所加判选条件所致.

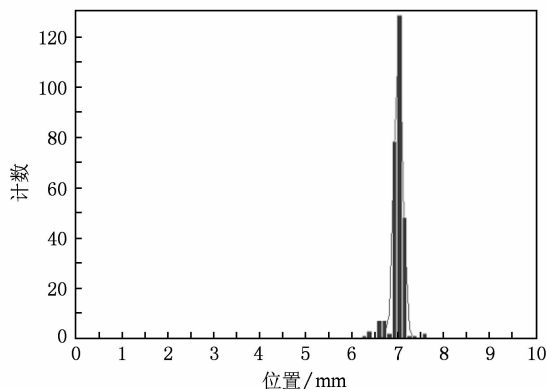


图6 X 方向位置分辨

其中, 该位置分布的标准偏差在扣除准直缝的影响后<sup>[3]</sup>就可以代表探测器的位置分辨率. 扣除掉准直缝影响后 X, Y 两个方向的位置分辨分别为 84  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.3. 位置分辨随三层 GEM 膜电压和改变时的变化

测试了三级 GEM 压差和的变化对 Y 方向位置分辨的影响. 由图 8 可见, 探测器的位置分辨随三级 GEM 压差和的增高而变好, 三层 GEM 膜压差和从 1040 V 到 1080 V 变化时, Y 方向的位置分辨从 98  $\mu\text{m}$  变化到 79  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.4. 探测器位置准确度与线性的测试

感应电荷重心法通过公式得到感应电荷位置.

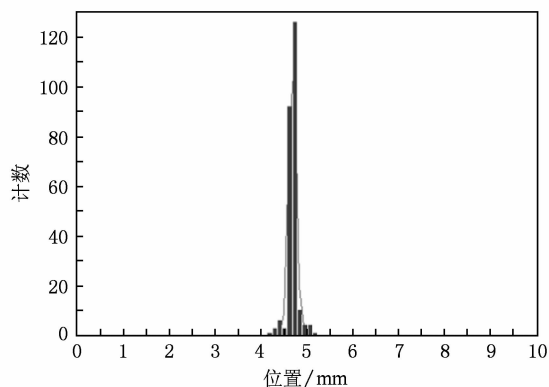


图7 Y 方向位置分辨

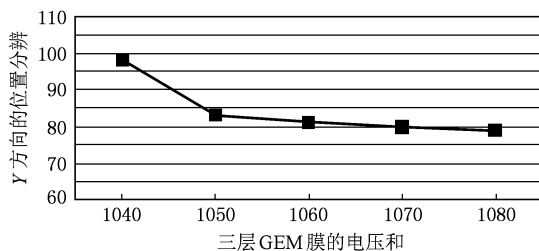


图8 Y 方向位置分辨随三层 GEM 膜电压和改变时的变化

当改变 X 射线的入射位置时, 通过测试探测器和电子学系统的响应, 可以得到感应电荷的位置. 将准直缝宽为 0.3 mm, 长 7 mm, 深 30 mm 的准直器固定在一个带有可移动丝杠且最小可移动步长为 25  $\mu\text{m}$  的平台上. 测试探测器位置准确度与线性时, 首先定位一个‘0’点, 得到 GEM 利用重心法得到的位置  $Y_0$ ; 然后以‘0’点为基准 125  $\mu\text{m}$  为步长沿着 Y 方向移动 8 个位置, 测试二维位置灵敏气体电子倍增器和电子学系统得到的感应电荷位置  $Y_i$ . 以  $[4 + 0.125 \times i]$  为横坐标,  $[4 + (Y_i - Y_0)]$  为纵坐标, 得到图 9 (‘4’是为了和探测器的测量坐标对应, 如图 7 所示, 探测器的测量位置在‘4’附近). 由此可见, 随着入射 X 射线位置的变化, GEM 测量得到的感应电荷位置相应的变化. 可见, 二维位置灵敏气体电子倍增器及电子学系统具有良好的位置准确度和线性.

## 4. GEM 用于二维模拟读出的讨论

### 4.1. 基于重心法测试时, 阳极和阴极读出的差别

重心法是通过测量读出平面感应电荷分布的重心来确定雪崩的发生位置, 其客观地要求一个事

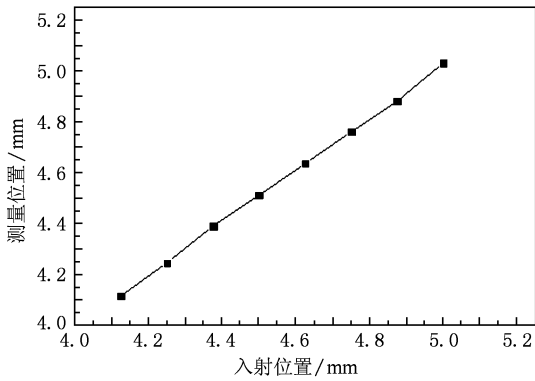


图9 位置准确性和线性的测量

例的感应信号应该至少在探测器的三个或三个以上的读出条上有感应信号. GEM 等微观探测器 (MPGD) 出现之前, 无论是多丝正比室 (MWPC) 还是阴极条室 (CSC) 等丝类探测器用阴极作为读出单元时, 其读出条一般是几个 mm; 而 GEM 为阳极读出, 读出条要几十到几百微米才能用作模拟重心法读出.

用阴极读出时, 其附近的电场图如图 10 所示. 阴极的信号主要来源于在阳极丝附近的强电场中正离子鞘的运动. 在此种不均匀电场下, 离子云较大, 且离子迁移速度为电子的  $10^{-3}$ , 扩散系数正比于  $t^{1/2}$  ( $t$  为漂移时间), 即反比与漂移速度<sup>[4]</sup>, 那么扩散相对于电子的扩散更大一些, 因此用阴极读出时, 读出条可以采用 mm 量级的周期间隙.

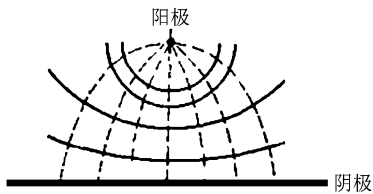


图10 阴极读出的探测器中的阴极附近的电场和电位示意图

对于 GEM, 用阳极读出, 其信号来源于从 GEM 微孔射出的雪崩电子在收集区中朝向阳极的运动. 由于 GEM 收集区相对于阴极附近的电场为近似均匀电场, 电子云较小, 且电子漂移速度快使得其扩散小. 这两个根本的物理因素就是使用阳极读出和阴极读出的根本区别. 因此利用 GEM 探测器基于重心法读出的时候, 为了使得感应信号能够分布在 3 个读出条以上, 一定使得读出条的尺寸在几十到几

百  $\mu\text{m}$  的数量级 (此具体尺寸要根据探测器的应用需求设计). 一般地, 如果想减少电子学路数, 除增加读出条的尺寸, 可以适当增加各级间隙, 此做法会牺牲一些空间分辨且整个探测器的各级 GEM 膜的电位要整体上调, 客观上对探测器的工艺提出了严格的要求. 当然如果是基于 GEM 的 TPC, 由于大的漂移区, 读出条可以在毫米甚至厘米的数量级.

#### 4.2. 第三层 GEM 触发信号的特性

本工作在 GEM 探测器工作电压和电场采用与国内外研究者近似的情况下, 观察到的 GEM 探测器第三层 GEM 膜表面的信号是正信号. 有些研究者认为根据 GEM 孔附近的物理: 有 40% 的雪崩电子返回到第三层膜的下表面损失掉, 60% 漂向下面的场, 那么第三层 GEM 下表面的信号应该为那 40% 的雪崩电子的运动感应到的信号, 极性应该为负. 但实验结果刚好相反, 且和文献<sup>b)</sup> 的结果符合. 此项讨论有待进一步的计算和讨论.

#### 4.3. 电子学及数据获取系统的触发方式的考虑

关于电子学及数据获取系统的触发方式的选择, 大体有以下两点: 第一, 可通过电子学系统产生触发信号; 第二, 本文采用的 GEM 探测器自触发方式, 考虑到信号大小的原因, 选用第三层 GEM 膜下表面通过交流耦合的方式引出信号. 在加高压的同时, 经由隔直电容输入前置放大器中作为整个数据获取系统的触发.

值得注意的是, 当采用此自触发方式时, 由于第三层 GEM 本身的面积导致其输出电容很大, 基本上无法用快时间特性的电流灵敏前置放大器得到信号. 本文也尝试选用输入阻抗约为  $390\Omega$  的电流灵敏前置放大器测试<sup>b)</sup>, 得到的是约  $\pm 10\text{ mV}$  的振荡或噪声. 因此若利用 GEM 膜引出触发信号, 必须使用开环增益大、对输入电容可以忽略的电荷灵敏前置放大器来得到信号. 一般情况下, 此触发信号的成形时间迟于读出条信号. 若使用传统的模数转换器 ADC, 触发信号必须先输入 ADC 的 gate 中开门, 且此类插件一般要求读出条的模拟信号要在开门后的几十 ns 后到达, 那么在读出条信号的延迟和衰减问题上, 需要综合考虑.

本工作基于 VME-ADC 存储系统的数据获取系

b) 由 KEK 的友人 Shoji Uno 提供.

统的触发方式,即先将数据缓存,一定时间内接收到触发信号,数据将开始传送到后续系统中.此种方法避免了模拟数据一定要在 ADC 开门后且一定时间内才可以接收的难题,使得 GEM 采用自触发方式的模拟数据获取系统得以施行.

也有文献中提到采用第一级 GEM 膜的信号作为触发,此信号早于读出条信号,使得上述提到的问题不那么尖锐,但是第一级 GEM 的信号比较小,需采用非常大灵敏度的电荷灵敏前置放大器输出,本文中并没有考虑此种方法.

#### 4.4. ‘Crosstalk’的作用

文献[5]中根据 Ramo 定理详细地说明和计算了对于平行板气体探测器,对单点电荷,在中心条有感应信号时,相邻条信号的极性先同后反的特性.这是一种探测器引起的噪声,通常电子学研究人员认为这是条与条之间的耦合干扰,叫做 crosstalk,文献<sup>[5]</sup>从理论和实验两方向验证了 GEM 也存在此种情况,并给出当收集区间隙和条宽的比例为  $\gg 1, 1:1, 2:1$  三种情况时相邻条产生的 crosstalk 的时间特性(ns 级)和幅度.值得注意的是,采用电荷重心法测量感应平面的电荷重心时,对于一次入射粒子的事例来说,并不是所有的雪崩电子只是朝向一个读出条运动,如果探测器设计合理,雪崩电子云应该至少朝向三个或三个以上读出条运动.因此,作重心法测试时,相邻条的信号应该是朝向他本身运动的电荷的感应信号,而不是由于电荷朝向临近它的读出条的运动所产生信号的同时,在它本身产生的这个 crosstalk.文献[5]通过实验,提出要将电子学阈值调成中心条的幅度的 20% 才能排除电子学噪声和 crosstalk 的干扰.

#### 4.5. 读出条的接法-浮置与接地

文献[6]特别对电极多电极的情况进行了分析计算,对于除信号电极连接负载外,其他电极接地和浮置的两种情况进行了讨论,特别是多个浮置电极间的电离雪崩效应从输出感应电极看是‘电透明的’,即可以叠加.此文献中的电极都是独立的放置,区别于本工作中的二维电极的相互穿插的排列方式.本文在测量位置分辨时,将除信号的读出条连接了 10 k $\Omega$  然后到地,若将此连接去除,测试的结果在分析时,观察到信号遍布在 16 个读出条区域

中,没有固定的分布.原因在于不连接‘地’会造成感应平面的电场的歧离和耦合信号等的增加.因此在本文中,除信号读出条外,其他空载的读出条与 10 k $\Omega$  电阻到地的连接是重要而必须的.电阻值是否最优化及相关的理论推导有待下一步实验的验证及详细计算.

## 5. 结论与展望

成功地设计制作了基于二维读出条模拟读出的 GEM 模型.通过两种读出条周期的实验,设计了合理的 GEM 探测器读出条结构和 GEM 模拟读出的自触发方式,经测试得到了优异的二维位置分辨: X 方向约为 84  $\mu\text{m}$ , Y 方向约为 75  $\mu\text{m}$ .研究了三级 GEM 压差之和对位置分辨的影响.对基于阳极读出的 GEM 用于模拟读出测试系统得到了一定的认识并给出了相关的讨论.

实验表明,基于一个感应平面的二维位置灵敏 GEM 探测器及新研制的读出电子学系统能够满足同步辐射探测器对位置分辨的要求.近期将安装全部电子学在同步辐射上作实验.

在本论文工作的基础上,可以在以下三个方面做进一步的深入研究:

1. 符合同步辐射时间结构的二维 X 射线探测器.由于同步辐射和高能物理实验的时间结构不同,因此研究符合同步辐射时间结构的二维探测器具有更为重要的意义.
2. 大面积 BSRF X 射线探测器.三级 GEM 模型及其读出电子学系统在  $^{55}\text{Fe}$  X 射线性能测试中表现出了良好的性能.大面积探测器将会满足更多实验站的需求.
3. 高精度,大面积中子探测器.通过本文的工作,已经对位置灵敏 GEM 探测器的特性有了初步的了解.再此基础上,添加一定的转换体(如膜上涂硼)等手段研制更高定位精度的中子探测器.这对满足最近建设的散列中子源对中子探测器的需求具有重要意义.

特别感谢 G. Bencivenni 教授对本工作的支持及有益的讨论.感谢盛华义研究员、庄保安研究员、赵豫斌副研究员、李仁英、赵平平、章鸿宇副研究员、关晓磊和赵东旭在电子学和 DAQ 方面的大力支持和帮助.感谢武汉大学本科生梁松在工艺实验方面给予的帮助.

- [1] Sauli F 1997 *Nucl. Instr. and Meth. A* **386** 531
- [2] Dong J, Xie Y G, Chen Y B, Liu Q, Ouyang Q, Xie W, Wei W 2007 *Chin. Phys. C* **31** 664
- [3] Li T B 1981 *Mathematical Treatment of Experiment* (Beijing: Science Press) p58 (in Chinese)[李惕碚 1981 实验的数学处理(科学出版社) 58]
- [4] Xie Y G, Chen C, Wang M, Lu J G, Meng X C, Wang F, Gu S L, Guo Y N 2003 *Particle Detectors and Data Acquisition 1* (Beijing: Science Press) p464 (in Chinese)[谢一冈、陈 昌、王 曼、吕军光、孟祥承、王 峰、顾树棣、过雅南 2003 粒子探测器与数据获取 第一版(北京:科学出版社)第 464 页]
- [5] Yu B, Mahler G J, Schaknowski N A, Smith G C 2001 *IEEE Transactions Nucl. Sci.* **48** 336
- [6] Gatti E, Padovini G 1982 *Nucl. Instr. and Meth. A* **193** 651

## The study of the two-dimensional position sensitive gas electron multiplier based on strips readout

Dong Jing Lü Xin-Yu Liu Ben<sup>†</sup> Liu Rong-Guang Ma Xiao-Yan Wang Lan

Chen Yuan-Bo Ouyang Qun Xie Yi-Gang

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 15 September 2009; revised manuscript received 9 October 2009)

### Abstract

To meet the need of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) in two-dimensional detectors, a two-dimensional position sensitive X-ray gas electron multiplier (GEM) detector based on PCB strips and analog readout were designed and constructed. Through the test of two kinds of strip pitches and based on the system of multi-channel charge sensitive preamplifier and VME buffer-ADC, the spatial resolution of soft X-ray was measured and pretty good spatial resolutions of about 84  $\mu\text{m}$  and 75  $\mu\text{m}$  respectively were obtained. The effect of the sum of the voltages applied on the three GEM foils on the spatial resolution was studied and position veracity and linearity of GEM was tested. The principles of GEM based on anode readout and the analog electronic system were clarified meanwhile.

**Keywords:** strips, gas electron multiplier, position sensitive, analog readout

**PACC:** 2940T, 2940H

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liuben@ihep.ac.cn