

# 三级GEM的性能及多路成像的实验研究

董静<sup>1,2;1)</sup> 谢一冈<sup>2</sup> 陈元柏<sup>2;2)</sup> 刘倩<sup>2</sup> 欧阳群<sup>2</sup> 谢万<sup>2</sup> 魏微<sup>2</sup>

1 (兰州大学核科学与技术学院 兰州 730000)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 报道研制的三级气体电子倍增器(Triple-GEM)的性能及多路成像的研究结果. 实验测得三级GEM对<sup>55</sup>Fe 5.9keV X射线全能光电峰的最佳能量分辨率为20.2%; 有效增益 $\geq 10^4$ . 利用96路8mm $\times$ 8mm的pad及电子数字系统成功实现多路成像.

**关键词** 气体电子倍增器 能量分辨率 有效增益 多路成像

## 1 引言

气体电子倍增器GEM<sup>[1]</sup> (Gas Electron Multiplier)是一种新型气体探测器,其基本部件是在两面敷铜且在其上蚀刻出大量微孔的聚酰亚胺(kapton)膜,并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.由于GEM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,因此有多方面的应用前景.

## 2 三级GEM的结构和实验装置

### 2.1 三级GEM的结构

图1为三级GEM的结构示意. GEM膜是在厚50 $\mu$ m的聚酰亚胺(kapton)膜的上、下表面各敷厚5 $\mu$ m的铜层,并在其上蚀刻直径为70 $\mu$ m,布局呈三角形,各孔中心距为140 $\mu$ m微孔的一种复合膜.微孔内部形状为双圆锥形(图1(a)), GEM膜有效面积为100mm $\times$ 100mm.在3层GEM膜上面有一个阴极,在其上加高压,与第1级GEM膜上表面的高压形成漂移电场 $E_D$ 使得原初电子到达GEM膜的孔区.3层GEM膜电压差分别为 $\Delta V_{G1}$ ,  $\Delta V_{G2}$ ,  $\Delta V_{G3}$ (由上至下).每两层膜之间的传输区电场 $E_{T1}$ ,  $E_{T2}$ 使得从上一层GEM膜孔出来的电子到达下一层GEM膜孔区.收集电场

$E_1$ ,放大和收集GEM倍增的电子(图1(b)).信号分别由100mm $\times$ 100mm pad一路读出(性能研究时)和96路8mm $\times$ 8mm pad多路读出(成像研究时).CAEN SY-127多路高压电源供给高压.阴极、3层GEM膜及pad读出板密封在1个室体中,室体充以工作气体(Ar/CO<sub>2</sub>(70:30)),采用1个大气压流气式供气.

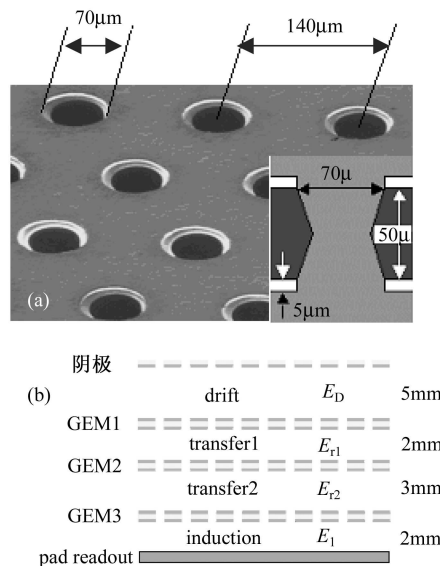


图1 (a) GEM膜孔规格; (b) 三级GEM结构图

### 2.2 测量三级GEM基本性能的实验装置

在测量三级GEM的基本性能时,信号仅由

2006-10-13 收稿, 2006-11-20 收修改稿

1) E-mail: dongj@ihep.ac.cn

2) E-mail: chenymb@ihep.ac.cn

一路100mm×100mm pad读出。 $^{55}\text{Fe}$  5.9keV X射线( $2.3 \times 10^7\text{Bq}$ )读出信号经过电荷灵敏前置放大器(北京核仪器厂86-01)、线性放大器(FH1003A)输入到多道分析器(ORTEC918A)中,分析谱形。

### 2.3 小尺寸pad读出与多路成像的实验装置

小尺寸pad读出与多路成像研究由96路

8mm×8mm pad(包括间隙,其中间隙约为0.5mm)读出。每路pad通过直接引线方式连接到各前置放大器(FBPANIK电流灵敏前置放大器)输入端。经由原ALEPH的前端电子学板(SGS card)、信号分配盒(splitter board)、自行设计的转换板和一个CAMAC时序数字获取系统插件(C187)实现数据获取,如图2所示,详见文献[2],现简述如下。

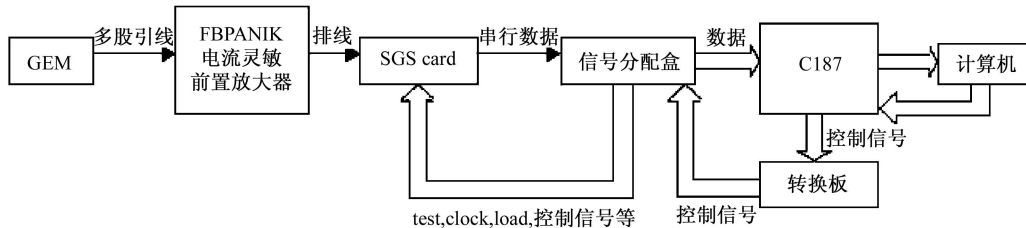


图2 数据获取结构图

SGS card内部芯片集成了甄别器以及移位寄存器,同时可以给出输入信号的digital or 信号,可利用此信号作系统触发。每块SGS card负责采集32路前置放大器的信号,通过甄别器转换成数字脉冲信号送入移位寄存器,等待触发信号digital or 选通。脉冲信号由移位寄存器串行输出给信号分配盒(splitter board),再将数据通过差分信号传输给CAMAC插件读入C187。其中,控制信号,自检(test),时钟(clock),加载(load)等信号由C187传送转换板,然后经信号分配盒分配给SGS card中的数据链。阈值电压也经信号分配盒加到SGS card上的各路输入端。load信号为1.2 $\mu\text{s}$ ,时钟信号为200ns。

软件系统基于C++和ROOT软件包编写。

## 3 实验结果

### 3.1 三级GEM的基本性能

#### 3.1.1 三级GEM有效增益随传输场 $E_{T1}$ , $E_{T2}$ 的变化

测量三级GEM有效增益随传输场 $E_{T1}$ ,  $E_{T2}$ 的变化时,固定3层GEM膜电压差 $\Delta V_{G1}$ ,  $\Delta V_{G2}$ ,  $\Delta V_{G3}$ 都为400V;漂移场 $E_D$ 为1.2kV/cm;收集场 $E_I$ 为2.5kV/cm。测量所得变化曲线如图3(a)所示。由图可知,三级GEM有效增益随传输场 $E_{T1}$ ,  $E_{T2}$ 同时改变而线性增加。

#### 3.1.2 三级GEM有效增益随收集场 $E_I$ 的变化

作此测量时,固定3层GEM膜电压差 $\Delta V_{G1}$ ,  $\Delta V_{G2}$ ,  $\Delta V_{G3}$ 都为400V;漂移场 $E_D$ 为1.2kV/cm;两

级传输场 $E_{T1}$ ,  $E_{T2}$ 均为2kV/cm。测量所得变化曲线如图3(b)所示。可以看到,三级GEM有效增益随收集场 $E_I$ 先是线性增加,当 $E_I > 4.5\text{kV/cm}$ 时趋于饱和。

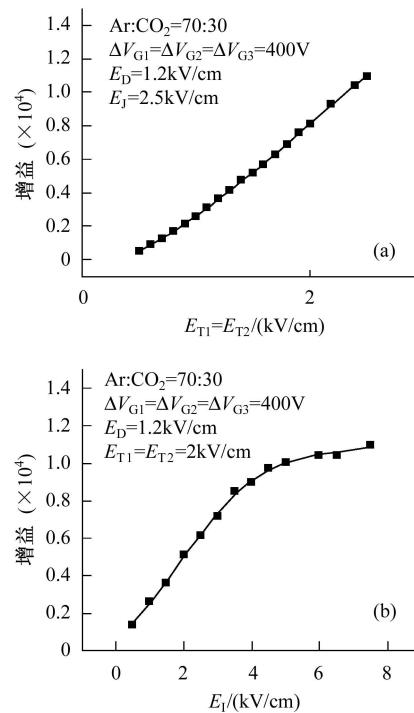


图3 (a) 三级GEM有效增益随两级传输场电压同时改变时的变化曲线; (b) 三级GEM有效增益随收集场变化曲线

#### 3.1.3 三级GEM有效增益随 $\Delta V_{G1}$ , $\Delta V_{G2}$ , $\Delta V_{G3}$ 同时改变的变化

当漂移区、传输区和收集区电场( $E_D = 0.8\text{kV/cm}$ ,  $E_{T1} = E_{T2} = E_I = 2\text{kV/cm}$ )确定,三级GEM的有效增益随 $\Delta V_{G1}$ ,  $\Delta V_{G2}$ ,  $\Delta V_{G3}$ 同时加大而

增加. 当  $\Delta V_{G1} = \Delta V_{G2} = \Delta V_{G3} = 420V$  时, 三级 GEM 的有效增益可达  $1.2 \times 10^4$  (图4).

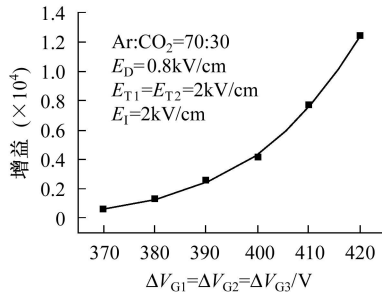


图4 三级GEM有效增益随  $\Delta V_{G1}$ ,  $\Delta V_{G2}$ ,  $\Delta V_{G3}$  同时改变的变化曲线

### 3.1.4 三级GEM能量分辨率随 $E_{T2}$ 和 $E_D$ 的变化

能量分辨率常用 <sup>55</sup>Fe 全能光电峰来测量, 并由能谱中的全能光电峰位与逃逸峰位之比来衡量电子学系统的线性. 图5为三级GEM的电子学系统测量所得 <sup>55</sup>Fe 的能谱图. 其中,  $E_D=2kV/cm$ ,  $E_{T1}=2.5kV/cm$ ,  $E_{T2}=2.3kV/cm$ ,  $E_1=2kV/cm$ ,  $\Delta V_{G1}=\Delta V_{G2}=\Delta V_{G3}=400V$ . 由图可得全能峰位为631.6道, 其半高宽 (FWHM) 为127.5道, 逃逸峰位为323.7道, 两者相比为1.95, 表明系统的线性很好. 用FWHM计算的能量分辨率为20.2%.

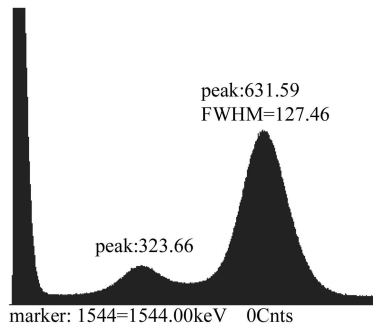


图5 三级GEM测量所得 <sup>55</sup>Fe 能谱图

其中  $E_D = 2kV/cm$ ,  $E_{T1} = 2.5kV/cm$ ,  $E_{T2} = 2.3kV/cm$ ,  $E_1 = 2kV/cm$ ,  $\Delta V_{G1} = \Delta V_{G2} = \Delta V_{G3} = 400V$ .

注意到传输区电场和漂移区电场对谱宽有重要影响.

(1) 能量分辨率随第二级传输区电场  $E_{T2}$  的变化  
传输区电场  $E_{T2}$  从  $1.67kV/cm$  升高到  $2.17kV/cm$ , 能量分辨率可从  $36.5\%$  改变到  $29.0\%$  (图6(a));

(2) 能量分辨率随漂移区电场  $E_D$  的变化

漂移区电场  $E_D$  从  $0.4kV/cm$  升高到  $2.0kV/cm$ , 能量分辨率可从  $29.0\%$  改进到  $20.2\%$  (图6(b)); 最佳能量分辨率 (用 FWHM 计算) 为  $20.2\%$ .

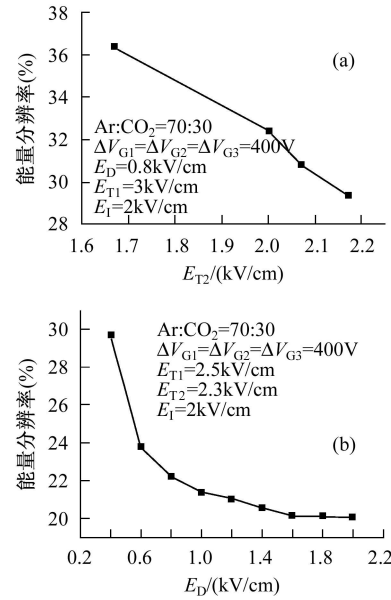


图6 (a) 三级GEM能量分辨率随第二级传输场变化; (b) 三级GEM能量分辨率随漂移场变化

### 3.1.5 前置放大器输出与pad尺寸的关系

在研究前置放大器输出与pad尺寸的关系时, 改变pad尺寸的方法是通过pad自行引线方式, 即一路pad为  $8mm \times 8mm$ , 每路pad引出一路即得到尺寸为  $8mm \times 8mm$  的pad; 将4路并联引出构成  $16mm \times 16mm$  的pad (注:  $16mm \times 16mm$  pad 面积是由4个小pad组成). 从分别使用两种电流灵敏前置放大器 (如FBPANIK 电流灵敏前置放大器<sup>1)</sup>、BESIII MDC 电流灵敏前置放大器<sup>2)</sup>) 和3种电荷灵敏前置放大器 (如文献[3]的电荷灵敏前置放大器、北京核仪器厂生产的86-01型电荷灵敏前置放大器、BESIII EMC 电荷灵敏前置放大器<sup>3)</sup>) 的情况来看, pad 尺寸为  $16mm \times 16mm$  时, 使两种电流灵敏前置放大器的输出信号幅度都明显变小. 一般电荷灵敏前置放大器对于这两种尺寸的pad, 信号幅度无明显差别. 估计是由于该前置放大器的开环增益很大, 三级GEM及输入引线等的外部电容可以忽略所致<sup>[4]</sup>.

电流灵敏前置放大器输出的波形上升、下降时间比较快 (分别约为  $100ns$ ), 这种快信号响应特点有利于

1) ETH-ZUERICH\_Institut fuer Hochenergiephysik Switzerland Note (1997.09.03)

2) 中国科学院高能物理研究所 BESIII MDC 电子学样机系统研制报告

3) 中国科学院高能物理研究所自制的用于 BESIII 量能器上的电荷灵敏前置放大器, 王佩良等设计.

发挥GEM具有高计数率的特点(因该探测器的脉冲信号完全由电子渡越贡献), 两种电流灵敏前置放大器对于两种pad尺寸的信噪比都大于10:1.

在屏蔽条件相同的情况下, 两种电流灵敏前置放大器和3种电荷灵敏前置放大器的输出进行比较, 电荷灵敏前置放大器的信噪比较大; 大尺寸pad (100mm×100mm)对电流灵敏前置放大器的信号响应极差.

### 3.2 多路成像

作多路成像研究时, 三级GEM电压设置分别为 $\Delta V_{G1}=370V$ ,  $\Delta V_{G2}=350V$ ,  $\Delta V_{G3}=340V$ ,  $E_D=1kV/cm$ ,  $E_{T1}=E_{T2}=E_1=2kV/cm$ . 用 $^{55}Fe(2.3 \times 10^7 Bq)$ 放射源辐照. 根据数据获取系统的平均噪声为40mV, 甄别阈值设定为100mV. 每次测量时间为60s, 将放射源经过厚度为5mm、孔径为2mm的铝准直孔, 放于GEM探测器窗的一处, 得到信号.

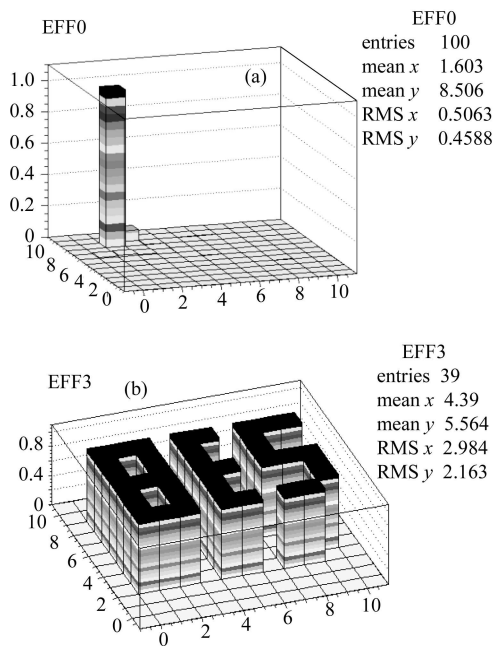


图7 (a) 一路pad信号情况; (b) 成像

图7(a)为一次测量的结果. 由于准直孔径的限制, 可明显看到仅有一个pad上有明显高于其附近1—4个pad上的计数. 有较小计数pad上的信号是由于信号感应或者是相邻pad间的电容耦合效应. 其余pad

由于信号都在阈值之下而没有计数.

将放射源在不同的位置移动, 就会在不同的pad上得到信号, 沿着‘BES’这样的轨迹移动, 得到了对应于不同的pad上的柱型图, 每处得到的图形都和图7(a)类似. 将图7(a)分别投影到X, Y方向得到一维图形, 然后分别对其进行高斯拟合, 用高斯拟合的中心值代表该次实验的X, Y值. 将每个pad上的数据进行上述处理后, 将所有(X, Y)位置信息在X, Y坐标轴上全部显示, 并同时显示对应的事例比例, 得到了BES图像. 如图7(b)所示, 其中X, Y方向即为pad的X, Y方向, Z方向为将总事例计数作为归一化系数的比例. 由此可见, 利用三级GEM可以有效实现多路成像.

## 4 讨论和结论

(1) 三级GEM气体探测器在适当的电压和电场下, 有效增益 $\geq 10^4$ . 漂移区和传输区电场的增强会使电子漂移速度加快, 使得能量分辨率改善. 所测最佳能量分辨率(用FWHM计算)为20.2%.

(2) 当pad尺寸变小, 可以用电流灵敏前置放大器适用于GEM的快时间特性. 因此, 为了发挥GEM的快时间特性及路数极多的大动态范围模拟量的读出, 开展集成度高的电流灵敏前置放大器的ASIC电路的工作是重要的.

(3) 电荷灵敏前置放大器对于输入电容没有明显依赖性, 信噪比相对较好. 因此, 开展集成度高的快电荷灵敏前置放大器的ASIC电路的工作更为重要.

(4) 采用多路引线读出, 并没有观察到预计可能发生的串扰问题, 此数据获取系统可以用于GEM. 本实验装置近期将在8keV的X光机、1GeV的脉冲式正电子束、热中子束上作进一步实验. 本工作采用的pad尺寸偏大, 为了使成像效果更为理想, 目前正在筹划利用更小尺寸的pad读出以及多路模拟量读出等.

特别感谢F.Sauli教授、G.Bencivenni教授、盛华义教授、庄保安教授、王佩良教授对本工作的大力支持及有益的讨论. 感谢周莉和陈锡辉在材料和工艺方面的协助.

**参考文献(References)**

- 1 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A386**: 531—534
- 2 LIU Qian, ZHANG Jia-Wen, CHEN Jin et al. Nuclear Electronics & Detection Technology. to be published (in Chinese)  
(刘倩, 张家文, 陈进等. 核电子学与探测技术. 待发表)
- 3 CHEN Yuan-Bo, XIE Yi-Gang, CHEN Zhi-Ping et al. Readout Electronics System of MWPC for Positron Electron Tomography. In: Editor of Nuclear Electronics & Detection Technology. Proceedings of the 3th National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology. Kunming, China, 1986.6 (in Chinese)  
(陈元柏, 谢一冈, 陈芝萍等. 多丝正比室正电子断层照相PET的读出电子学系统. 全国第三次核电子学与探测器会议. 昆明, 1986, 6)
- 4 XIE Yi-Gang, CHEN Chang, WANG Man et al. Particle Detector and Data Acquisition. Beijing: Science Press, 2003. 464—467 (in Chinese)  
(谢一冈, 陈昌, 王曼等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003. 464—467)

## Experimental Study of Triple-GEM' Performance and a Multi-channel Image

DONG Jing<sup>1,2;1)</sup> XIE Yi-Gang<sup>2</sup> CHEN Yuan-Bo<sup>2;2)</sup> LIU Qian<sup>2</sup>  
OUYANG Qun<sup>2</sup> XIE Wan<sup>2</sup> WEI Wei<sup>2</sup>

1 (Lanzhou University, School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou 730000, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** Experimental study of the performance of triple-GEM and a multi-channel image was reported. The measured experimentally best energy resolution of  $^{55}\text{Fe}$  5.9keV X-ray full energy photo electron peak is 20.2%, effective gain  $\geq 10^4$ . Image was obtained by using 96 channels digital DAQ system which was composed of 96 8mm $\times$ 8mm pads and 96 electronics channels.

**Key words** Gas Electron Multiplier, energy resolution, effective gain, multi-channel image

---

Received 13 October 2006, Revised 20 November 2006

1) E-mail: dongj@ihep.ac.cn

2) E-mail: chenyb@ihep.ac.cn