

文章编号: 1007-4627(2012)04-0379-05

# 三级 GEM 探测器的增益一致性实验研究

董丽媛<sup>1,2,3</sup>, 祁辉荣<sup>2,3</sup>, 李玉红<sup>1</sup>, 吕新宇<sup>2,3</sup>, 欧阳群<sup>2,3</sup>, 陈元柏<sup>2,3</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;)

**摘要:** 随着二维 GEM 气体探测器在 X 射线成像探测领域的应用, 三级 GEM 的探测结构和电场均匀性带来的增益一致性修正问题, 成为需要深入研究的课题内容。介绍了有效探测面积为 100 mm × 100 mm 的三级倍增 GEM 探测器, 共采用 100 路阵列读出, 每路读出 Pad 面积为 9.5 mm × 9.5 mm。测量了<sup>55</sup>Fe 放射源准直入射的全能峰谱。实验表明, 随着时间的变化, 探测器的增益基本上保持稳定; 随气流的增大, 增益由变化明显到变化不大。GEM 探测器各个阵列单元的增益一致性良好(>80%); 能量分辨率在 0.18~0.22 之间, 运用最小二乘法拟合给出增益一致性的修正结果, 修正后相差约 0.1, 为 GEM 气体探测器的增益一致性修正方法提供了参考方案。

**关键词:** 气体电子倍增器; 增益一致性; 能量分辨

**中图分类号:** O572.21+2

**文献标志码:** A

## 1 引言

气体电子倍增器(Gas Electron Multiplier, 简称 GEM)是 20 世纪 90 年代, 由欧洲核子研究中心(CERN)的 Sauli 等<sup>[1]</sup>发明的一种新型的微结构气体探测器。标准 GEM 是由双面覆铜的 Kapton 薄膜组成。在薄膜上刻蚀出孔距为 140 μm, 孔径为 70 μm 的阵列小孔, 当两面铜膜上加高压后, 小孔内会形成很强的电场, 一定数量的电子通过小孔时在工作气体中倍增放大, 读出板上感应到信号进行记录和分析。一般情况下, 单层 GEM 的放大倍数在~30 倍左右, 实际使用中采用三层级联 GEM 进行放大, 有效增益可以达到 8 000 以上。由于其具有计数率高、位置灵敏、读出方式灵活和成本相对低廉等优点, 已经在粒子物理和医学成像等领域得到了广泛而深入的研究, 具有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

随着 GEM 探测器在粒子物理实验和低能 X 射线成像探测领域的应用, 三级 GEM 的探测结构和电场等因素带来的增益变化, 导致图像的分辨受到一定的影响, 因此需要对增益修正进行深入研究。

本文基于有效面积为 100 mm × 100 mm 的三级 GEM 探测器, 采用每个 Pad 面积为 9.5 mm × 9.5 mm, 共 100 路阵列读出的方法, 通过测量<sup>55</sup>Fe 放射源准直入射的全能峰谱信息, 计算得到对应于每个 Pad 单元的增益和能量分辨<sup>[3]</sup>, 根据最小二乘法给出了修正结果, 测量和分析了增益随时间、高压、气流变化的影响关系。

## 2 实验原理

### 2.1 理论计算

增益的测量是基于分析在探测器入射窗上方准直放置的<sup>55</sup>Fe-X 射线放射源, 对得到的能谱全能峰峰值进行计算。X 射线进入探测器后, 与工作气体(Ar/CO<sub>2</sub> = 70/30)中的气体分子, 主要为 Ar 发生相互作用, Ar 原子电离产生电子-离子对, 阳离子在漂移电场作用下向上漂移, 最终被漂移电极吸收; 而电子则在电场作用下, 向下漂移有一部分进入 GEM 的孔中, 在 GEM 膜的孔中发生雪崩放大, 通过三级 GEM 级联放大后由阴极读出板感应读出。

收稿日期: 2012-01-31; 修改日期: 2012-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11127508)

作者简介: 董丽媛(1985—), 女, 山西平定人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: dongliyuan@ihep.ac.cn

通信作者: 祁辉荣, E-mail: qih@ihep.ac.cn

$^{55}\text{Fe}$  发出的 X 射线能量为 5.9 keV, 原初电离数可估算为

$$\begin{aligned} n_T &= n_{\text{Ar}} \times 70\% + n_{\text{CO}_2} \times 30\% \\ &= \frac{E}{\omega_{\text{Ar}}} \times 70\% + \frac{E}{\omega_{\text{CO}_2}} \times 30\%^{[4]} \\ &= \frac{5.900}{26} \times 70\% + \frac{5.900}{33} \times 30\% \\ &= 158.85 + 53.64 = 212.49, \end{aligned} \quad (1)$$

故可知原初电离电荷量  $Q_0$  为

$$\begin{aligned} Q_0 &= en_T = 1.6022 \times 10^{-19} \times 212.49 \\ &= 3.3998 \times 10^{-17} \text{ C} = 0.033998 \text{ fC}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $e$  为元电荷  $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $n_T$  为电子的原初电离数。

测量中采用 ORTEC 公司的 PCI2K 多道分析器获取, 输入电荷量与获取的道值在一定范围内存在一线性关系, 即

$$Q' = a + b \times D', \quad (3)$$

其中  $Q'$  为采用信号发生器输入的标准谱通过前放输入的电荷量,  $D'$  为多道上对应的道值。实验测得:  $a = -1.92163$ ,  $b = 0.0819637$ 。

通过对  $^{55}\text{Fe}$  全能峰的测量得到探测器的增益计算公式为

$$G = \frac{-1.92163 + 0.0819637 \times D}{0.03398} \quad (4)$$

其中,  $D$  为多道测得的  $^{55}\text{Fe}$  全能峰对应的道值。

## 2.2 测量装置

实验测量原理如图 1 所示。测量中采用的是有效面积为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的三级 GEM 探测器,

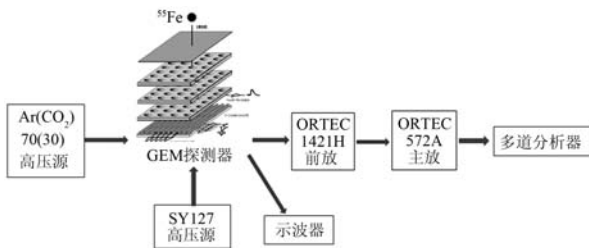


图 1 实验测试原理图

探测器结构从上往下依次为漂移极 (Cathode), GEM1, GEM2, GEM3 和感应电极 (Anode)。其中漂移区、第一传输区、第二传输区和收集区间隙分别为 8, 2, 2 和 2 mm。漂移电极采用总厚度约为

$50 \mu\text{m}$  的单面覆铜 Kapton 膜, 铜层厚度约为  $5 \mu\text{m}$ 。读出板采用二维感应读出方式, 共 100 个阵列读出, 每个 Pad 面积为  $9.5 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$ , 间距为 10 mm。GEM 探测器使用的工作气体是 Ar 和  $\text{CO}_2$  混合气, 比例为 70% 和 30%, 采用流气式供气, 出口端泡泡瓶内液面高度为 1~2 mm, 测量时的气流量选用 75 mL/min, 密闭气室漏气率  $< 0.1 \text{ mm H}_2\text{O/h}$ 。

探测器采用 7 路高压 (Mod. SY127 高压源) 独立供电。其中漂移极和每级 GEM 电极都分别串型连接了 10 MΩ 电阻, 进行高压保护。读出电极相连的前置放大器选用了 ORTEC 公司的 1421H 前放; 主放采用 ORTEC 公司的 PC572A; 信号观测使用 Lecory 公司 Lecory WaveSurfer 64Xs 型示波器。测量中使用的  $^{55}\text{Fe}$  放射源是强度为 1 mCi (即  $3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$ ) 和直径为 6 mm 的面源。

## 3 分析与讨论

### 3.1 测量与修正结果

增益的测量是  $^{55}\text{Fe}$  通过  $10 \times 10$  个准直孔, 考虑到放射源的尺寸, 选用准直孔孔径为 3 mm, 厚度为 10 mm 的铝准直板, 以确保放射源可以与读出板上的 Pad 中心正对, 保证 X 射线的垂直入射。测量中发现, 由于漂移极铜面的厚度不均匀, 导致边缘的 36 个孔部分孔信号过小, 故选取了中间的 64 个 Pad 上的信号。测量时, 将  $^{55}\text{Fe}$  源依次放在中间的  $8 \times 8$  个孔上, 用多道依次获取相应的能谱, 通过多道记录全能峰对应多道的道值, 由式 (4) 计算得到对应的增益结果。其中各级 GEM 电极电压为 360 V, 传输区电场强度为 3 kV/cm, 气流量为 75 mL/min。图 2(a) 给出了测得的  $^{55}\text{Fe}$  在第 2 行第 3 列的 Pad 上准直入射时的能谱, 能量分辨为 18%。

测得的 64 个 Pad 的相对增益的结果 (灰度显示) 如图 2(b) 所示, 其中以增益 3 000 进行归一计算,  $x$  和  $y$  轴为读出板上对应的每个 Pad 的位置坐标, 灰度显示各个 Pad 的相对增益, 由此得出整个读出板面上的增益分布图谱。通过图 2(b) 可以看出, 增益中间颜色略深, 到四周时依次变浅, 也就是说相对增益中间略微偏大, 四周略微偏小。图 3(a) 给出了每个 Pad 按顺序从左上到右下依次从 1~64 的增益的二维显示, 显示了相对增益随 Pad 数

的变化。从图 3(a)的结果显示可以看出，在探测器的有效测量面积内各个位置的增益相对稳定，分布在 0.69~0.92 之间，相差约 0.2 左右，这里  $N_G$  表示归一化的增益值。图 3(b)显示了能量分辨随 Pad 的变化。可以看出，能量分辨一致性良好，在 18%~22% 之间，相差为 0.04 左右，这里  $E_R$  为测量的位置分辨数值。

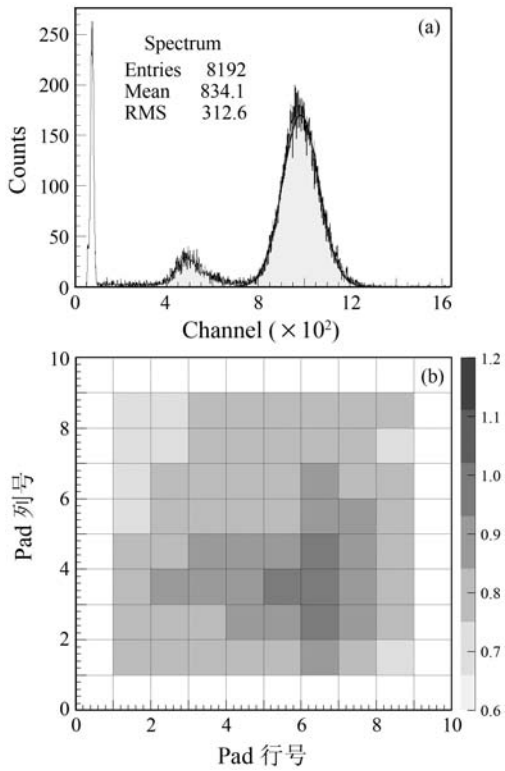


图 2  $^{55}\text{Fe}$  能谱和相对增益分布图

(a)多道测得 2/3 阵列能谱，(b)每个 Pad 上的相对增益。

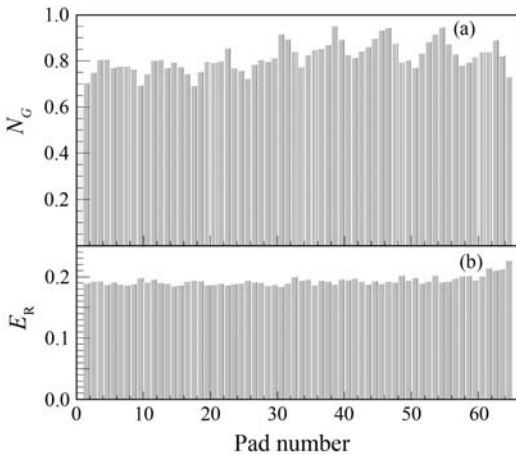


图 3 增益和能量分辨图

(a)各个 Pad 对应的增益二维显示，(b)每个 Pad 上的能量分辨二维图谱。

GEM 的增益不均匀性：运用最小二乘法对 GEM 增益的二维图进行拟合，得到一个线性的关系，即： $Y=0.758\ 917+0.001\ 715\ X$  (其中  $Y$  为相对增益， $X$  为 Pad 数)，结果如图 4 所示。修正后增益范围分布在 0.76~0.86 之间。

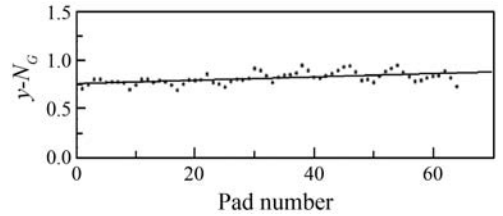


图 4 增益一致性的修正结果

### 3.2 气流的影响

在 GEM 电极电压为 360 V 时，改变探测器工作气体的气流率，分别调整为 50, 75, 100 和 150 mL/min 时，测量 GEM 探测器不同区域上增益的变化。图 5 给出了增益随气流量变化的结果。

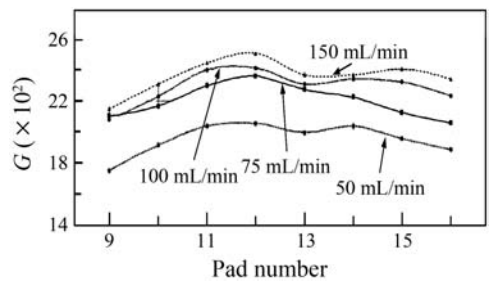


图 5 探测器 增益随气流的变化

分析实验结果可以得出，在 50 mL/min 时，气体增益略小，增至 75 mL/min 时，增益明显变大，增至 100 和 150 mL/min 后随着气流量增大，增益的涨幅明显变小。图 5 中显示各个相邻 Pad 的相对增益随气流量的变化不大，而每个 Pad 上的增益，随着气流量的增大，增益先逐渐增大，后变化不大。在探测器工作状态不改变的情况下，引起增益变化的外界因素可能是气体组分、气压、温度和放射源强度等的影响。由 2.2 节测量装置中密闭气室的漏气率和出口端泡泡瓶内硅油液面高度等指标可知，混入新气体引起气体组分变化的可能性不大，气体压力变化也较小；测量中放射源  $^{55}\text{Fe}$  是强度约为 1 mCi 和直径为 2 mm 的面源，工作时准直入射的强 X 射线会引起局部工作气体解离<sup>[5]</sup>，流量较小时，

补充的气体无法充分置换,使得探测器增益比大流量时小。当气流率逐渐变大,该影响相应减弱,增益变化不大。因此在使用不同强度的放射源时,对最小气流量有一定的要求。在流气室工作模式下,考虑到室体结构和气体成本,气流率应工作在相对优化的状态,该测量中一般选用的气流量为 75 mL/min。

### 3.3 工作电场的影响

改变每层 GEM 的工作高压,测量增益随工作电场的变化情况。测量时分别设定 GEM1/GEM2/GEM3 高压分别为 380 V/360 V/340 V, 360 V/360 V/360 V 和 370 V/370 V/370 V,通过改变了 GEM 孔内的电场大小,测量探测器增益的变化。图 6 给出了 GEM 气流量为 75 mL/min 时增益随高压变化的结果。

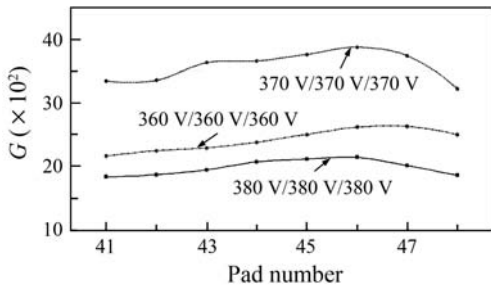


图 6 增益随漂移电场的变化

图中分析可以得到:当 GEM 电极的总电压为  $V_{\text{GEM}}=1\ 080\ \text{V}$  时,360 V/360 V/360 V 的增益略高于 380 V/360 V/340 V 的增益,在总电压相等时,改变三层 GEM 间的工作高压分配,对增益影响不大;当  $V_{\text{GEM}}=1\ 110\ \text{V}$  (370 V/370 V/370 V) 的增益明显高于总电压为  $V_{\text{GEM}}=1\ 080\ \text{V}$ ,即随着工作高压的增大,气体的增益显著增大。这主要是由于随着 GEM 电极电压的增大,孔内的电场增大,电子在穿过小孔时发生的二次碰撞增多,感应电极感应的电子增多,使有效增益增大。

### 3.4 时间的影响

为了研究增益的长时间稳定性,将 Fe 源放在准直孔上,每隔 1 min 测一次增益,测试了增益随时间的变化曲线。图 7 给出了各级 GEM 电极电压为 360 V、传输区电场强度为 3 kV/cm 和气流量为 75 mL/min 时的增益随时间的变化。

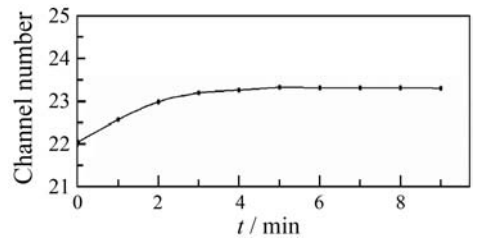


图 7 增益随时间的变化

从图 7 可以看出,增益随时间的变化:在开始的 1 min 内,增益随时间逐渐增大;当 3 min 后,增益逐渐趋于稳定;增益随时间变化,在误差允许范围之内,相对误差在 0.8% 左右,稳定性较好。由于 GEM 电极的充电效应,入射的电子会有一部分被 GEM 电极吸收,从而影响了电子的透过率和有效增益,故在开始的 2 min GEM 的增益随时间稍有增长<sup>[6]</sup>。在实际测量过程中,每个 Pad 上增益的谱图均在放射源放置 3 min 之后进行多道采集。

## 4 结论

为了克服大面积气体探测器面临的一个共性的问题——增益的不一致性问题。本文着重对面积为 100 mm×100 mm GEM 气体探测器增益的不一致性进行了实验研究,并分别讨论了时间、气流和工作电场对探测器增益的影响。

通过分析实验数据,得到了探测器在有效面积为 80 mm×80 mm 共 64 个单元上的增益,进行最小二乘法的修正,为探测器的增益修正方法提供了参考。测量结果表明,GEM 探测器的增益略有差异,呈现中间大,四周小的趋势,随着时间的变化,探测器的增益基本上保持稳定;随气流的增大,增益由变化明显到变化不大,工作气流率需要优化考虑。

### 参考文献 (References):

- [1] SAULI F. Nucl Instr and Meth A, 1997, **386**: 531.
- [2] LAI Yongfang, LI Yulan, LI Yuanjing, *et al.* HEP & NP, 2006, **30**(8): 767(in Chinese).  
(来永芳,李玉兰,李元景,等.高能物理与核物理.2006,**30**(8):767.)
- [3] ALVES A, DE ANDRADE F L M, BARBOSA A F, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2008, **591**: 374.
- [4] XIE Yigang, CHEN Chang, WANG Man, *et al.* Particle De-

tector and Data Acquisition[M]. Beijing: Science Press, 2003: 34—37.  
(谢一冈, 陈昌, 王曼, 等. 粒子探测器与数据获取[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 34—37.)

[5] ALFONSI M, BENCIVENNI G, DE SIMONE P, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **518**: 106.  
[6] ALFONSI M, CROCI G, DUARTE P S, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2011, **12**: 059.

## Gain Uniformity Experimental Study Performed on Triple-GEM Gas Detector

DONG Li-yuan<sup>1, 2, 3</sup>, QI Hui-rong<sup>2, 3</sup>, LI Yu-hong<sup>1</sup>, LÜ Xin-yu<sup>2, 3</sup>, OU-YANG Qun<sup>2, 3</sup>, CHEN Yuan-bo<sup>2, 3</sup>

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

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the application of the two-dimensional GEM gaseous detector in X-ray imaging, the correction method of gain uniformity caused by triple-GEM avalanche structures and electric field uniformity should be studied. The paper reported the study of the triple-GEM detector with effective area  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  used the Pad's size of  $9.5\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$ . In the test, 100 readout channels were designed. Results showed that gain remained stable over time; as air flow increases, gain from increases obviously to changes very little. Particularly, triple-GEM's gain uniformity was very good (more than 80%) and the range of energy resolution was from 0.18 to 0.22. To improve gain consistency of results, the difference value revised was obtained to be about 0.1 by the least square method. It provided a better method to improve gain uniformity of GEM detector.

**Key words:** gas electron multiplier; Gain uniformity; Energy resolution