

GEM 气体探测器的增益特性*

安少辉 李澄¹⁾ 许咨宗 孙勇杰 周意

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 研制一种双层结构的 GEM 气体探测器用于 X 射线成像和带电粒子径迹测量. 使用铜靶 X 射线管产生的高能量 X 射线对其气体放大倍数, 电荷传输效率, 增益稳定性进行测试. 实验结果显示: 在入射 X 射线通量为 10^5 Hz/mm^2 时, 双层 GEM 探测器的有效增益达到 10^4 以上, 并且具有长时间稳定性.

关键词 气体电子倍增器 高计数率 气体探测器

1 引言

以多丝正比室(MWPC)为代表的气体探测器在粒子物理实验中有着广泛的应用,但是它的局限性也很明显. 由于阳极丝距和定位方法的限制,空间分辨率大于 0.2mm,由于离子收集时间影响,单丝计数率小于 $10^4/\text{s}$. GEM(Gas Electron Multiplier)^[1]是一种新型电子倍增器件. 使用 GEM 电极制成的气体探测器,由于具有高增益、物质质量小、适用于高计数率环境以及具有更高的位置分辨等特点,正在研究用于新一代高亮度粒子物理实验和高计数率 X 射线成像^[2,3].

为了研制一种新型的 X 射线成像和带电粒子径迹探测器,在对单层 GEM + MWPC 探测器研究基础上^[4],设计了一种双层结构的 GEM 探测器的实验模型,研究了有关测量方法,测量了气体放大倍数,电荷传输效率,并使用铜靶 X 射线管产生的高通量特征 X 射线对其增益稳定性进行了测试,获得了较好的实验结果.

2 GEM 电极结构

GEM 电极是一种采用化学蚀刻法生成高密度

小孔的复合薄膜,中间绝缘层为 Kapton(聚酰亚胺)绝缘薄膜,上下两面镀的是铜. 图 1 是实验中采用双掩膜蚀刻工艺制作的一种 GEM 电极结构,其中孔间距 $140\mu\text{m}$,孔直径 $D = 80\mu\text{m}$,孔中心直径 $d = 60\mu\text{m}$,绝缘厚度 $T = 50\mu\text{m}$,铜箔厚度 $S = 5\mu\text{m}$.

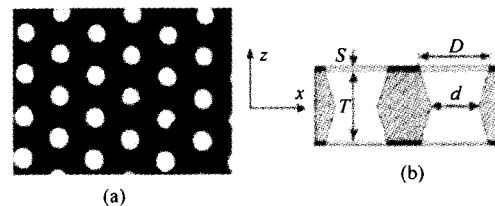


图 1 (a) 显微镜下拍摄的 GEM 的照片; (b) GEM 几何结构

使用有限元算法和 3D Maxwell 电场模拟程序对这种锥形结构的 GEM 电极内电场的分布进行模拟和计算^[5],图 2(a)是电场沿 z 轴的变化曲线. 取孔中心轴为 z 方向(坐标选取方法同图 1),GEM 极间电压为 550V, GEM 上下空间场强分别为 2kV/cm, 6kV/cm,工作气体为 70%Ar + 30%CO₂. 由图 2(a)可以看出,在 GEM 的中心处($z = 0, x = 0$),电场强度接近 6kV/cm. 当电子漂移接近任意一个孔时,将在孔内产生雪崩放大过程. 图 2(b)是 GEM 中心截面上(x, z 平面)的电场线的分布.

2003-07-07 收稿,2003-09-08 收修改稿

* 国家自然科学基金(10075045)资助

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

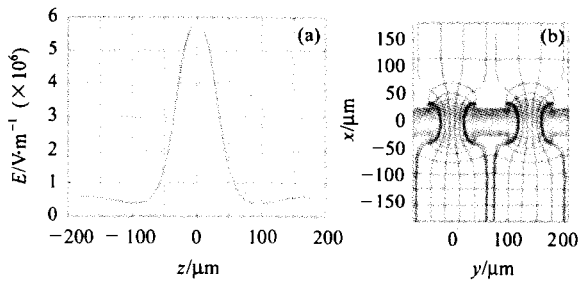


图 2 (a) 在 $x = 0$ 处, 电场随 z 坐标的变化曲线;
(b) GEM 的电场线分布

3 GEM 电极性能

加工好的 GEM 电极的绝缘性能要求达到: 在空气中(湿度小于 30%), 每个 GEM 工作在 500V 下的漏电流小于 5nA, 即绝缘电阻大于 100GΩ; 在工作气体环境下, 每个 GEM 工作在 500V 下的漏电流小于 1nA.

使用铜靶 X 射线管产生的高强度 X 射线测量了单层 GEM 的有效增益(测量装置见图 3), 其内部电场结构按照电子运动路径可分为漂移区(Drift)、GEM 雪崩放大区, 传输区(Transfer). 用微电流表测量每个电极的输出电流. 实验结果见图 4, 其中 I_s 是电子到达收集电极的电流, 由于电力线部分终止在 GEM 电极的下表面, 使得雪崩放大过程产生的电子和离子有部分将沿电力线漂移到其上下表面, 产生电流(I_i, I_b). 实际测量中得到的是有效增益为 $M = I_s / (enR)^{-1}$, 其中 e 为电子的电荷量, n 表示原初电离对数, R 是入射 X 射线强度. 探测器的绝对增益应为 $M' = (I_s + I_b) / (enR)^{-1}$.

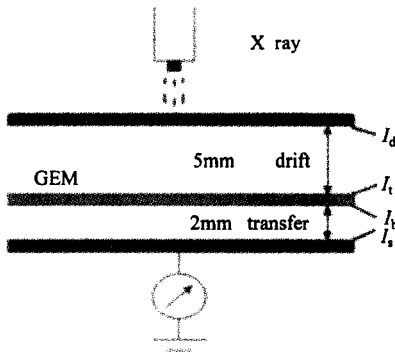


图 3 单层 GEM 有效增益测量装置

图 5 是相同实验条件下的 M/M' 比值与传输场强之间的关系, M/M' 数值的大小可以反映 GEM 电极的电子的透过率, 可以看出传输电场对电子的透

过率影响. 图 6 是单层 GEM 有效增益随 GEM 极间电压的变化关系. 通过这些测量数据可以检验加工的 GEM 电极质量.

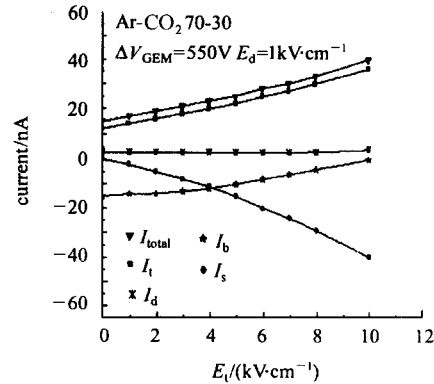


图 4 单层 GEM 各级上的漏电流

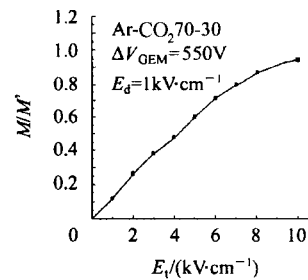


图 5 GEM 有效增益与绝对增益的比值随传输电场的变化

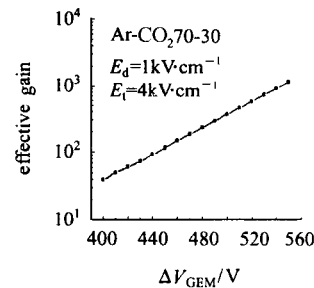


图 6 单层 GEM 有效增益

4 有效增益

实验制作的一种有效面积为 100mm × 100mm 的双层 GEM 探测器结构见图 7. 信号读出电极用厚度为 0.3mm 印刷电路板构成, 条宽度 0.35mm, 每个条间距均为 0.8mm. 为了保持漂移场电场分布的均匀性和提高入射 X 射线探测效率, 漂移场气隙为 5mm. 对于传输区间距, 考虑到电子运动过程中的扩散效应和 GEM 薄膜本身的平整性对电场分布的影响, 选择了 2mm. GEM 固定在环氧树脂(Epoxy)支撑框架上. 在探测器的上下两面用金属框架做固

定. 工作气体选用 Ar + CO₂ 为气体. 采用独立高压的连接模式, 并且每路高压通过 10MΩ 的保护电阻连到探测器相应电极上. 考虑到场强分布对电子透过率的影响(见图 8), 我们选择各区间场强比为 1:4:4, 相应的电压为漂移场 $\Delta U_d = 500V$, 传输场 $\Delta U_{t1} = \Delta U_{t2} = 800V$.

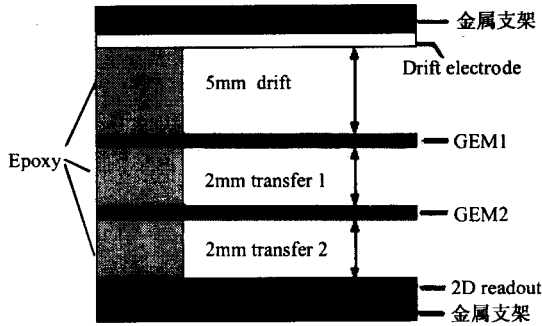


图 7 GEM 探测器的实验模型结构

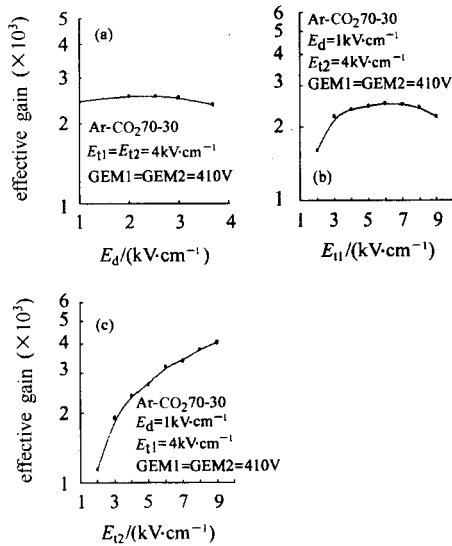


图 8 (a) 有效增益随漂移场变化; (b) 有效增益随第一极传输场变化; (c) 有效增益随第二极传输场变化

使用⁵⁵Fe(5.9keV) X 射线源和电荷灵敏放大器, 测量收集电极的电子信号来确定探测器的有效增益. 图 9 是不同气体比例下的有效增益随电压的变化. 在每种气体比例下, 分别改变两层 GEM 的电压, 得到了气体放大倍数与两层 GEM 电压之间的关系. 从实验数据可以看出: 当 ΔV_{GEM1} 升高 10V, 而 ΔV_{GEM2} 降低 10V, 两者的放大倍数基本相同; 淬灭气体(CO₂)的增加使得 GEM 探测器的工作电压增加; 气体比例为 70:30 情况下的气体放大倍数相对较高并且电压工作范围较大. 气体比例为 60:40 时虽然工作坪长较长, 但放大倍数比气体比例为 70:30

要小.

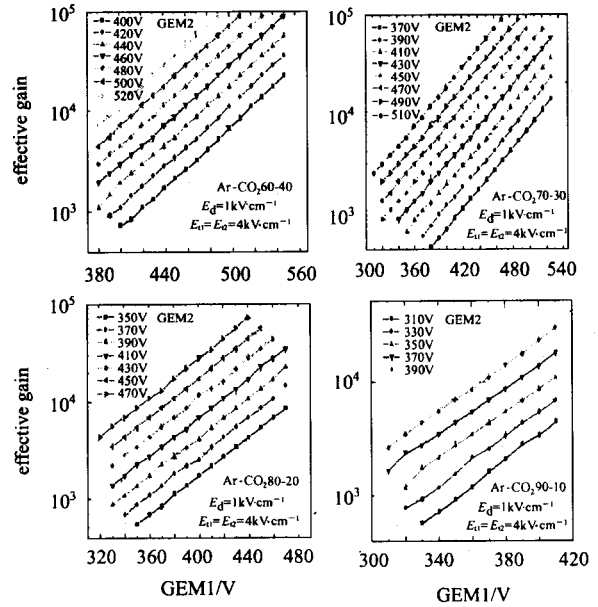


图 9 Ar + CO₂ 不同气体比例的有效增益

5 增益稳定性

对 X 射线管产生的 X 射线进行准直后(准直孔长 45mm, 直径 1mm), 测量双层 GEM 探测器的增益稳定性, 入射 X 射线的通量可以通过改变 X 射线管灯丝的电流来控制. 实验中使用的微聚焦 X 射线管产生的特征 X 射线出射光斑直径为 0.17mm, 考虑到韧致辐射的影响, 准直后的 X 射线在 GEM 电极上的光斑直径约为 1.6mm. 图 10 是使用 GEM 探测器和多丝正比室 MWPC(5mm 气隙)测量的结果, 与 MWPC 比较 GEM 探测器的增益稳定性是明显的. 图 11 是在计数率为 $2 \times 10^5/s$, 有效增益为 10^4 条件下, 连续监测两周的测试结果, 图中每个测量点对应的是输出信号幅度随原初电离粒子数的累积电荷的变

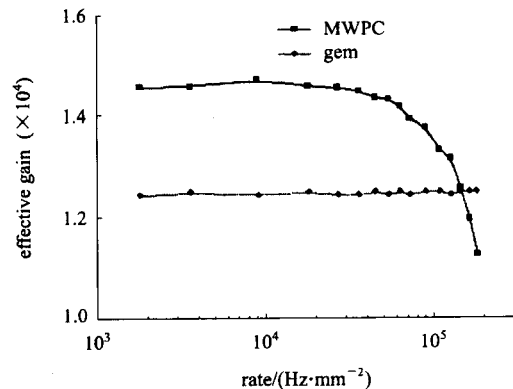


图 10 GEM 和 MWPC 有效增益随 X 射线的通量的变化

化. 上述测量中使用了反堆积谱仪放大器 (ORTEC 671), 对 10^5 计数/s, 峰位的变化小于 1%.

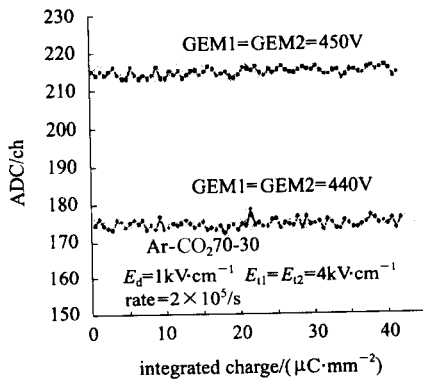


图 11 时间稳定性

6 结论

使用 GEM 电极配合微型电极条读出, 可以制成不对称型结构气体探测器. 由于 GEM 电极的特殊几何构型和电场分布, 它不仅具有产生电子雪崩放大需要的电场强度, 而且由于电子放大与电子离子收集过程分开进行, 同时部分正离子在漂移过程中被 GEM 上电极收集, 使得空间电荷效应的影响减小. 与多丝正比室相比, 它不用通常的金属丝布局来构成电场区, 可以有效减小气隙和空间电荷效应, 与微条气体室 (MSGC) 相比, 不会由于绝缘支撑造成在高计数率情况下的局部电场不稳定. 实验证明: 在工作气体比例为 70%Ar + 30%CO₂, GEM 工作电压为 450V, 双层 GEM 探测器的有效增益达到 10^4 以上, 并且可以稳定工作在粒子通量为 $2 \times 10^5 \text{ Hz} \cdot \text{mm}^{-2}$ 条件下, 显示了 GEM 气体探测器的增益特性.

GEM 探测器有效增益比 GEM 本身的气体放大倍数要小, 这取决于探测器内部的电场分布, 电荷传

输效率, 以及电子向收集电极漂移过程中库仑散射等因素的影响. 尽管在实验测量的结果显示双层 GEM 探测器的有效增益可以或接近达到 10^5 , 但是由于电场强分布在孔的边缘较大 (见图 12, 计算条件同图 2), 容易产生局部的放电现象造成探测器工作不稳定. 在测量中发现, 当 GEM 电压超过 480V 后, 探测器就会产生一些大信号并有时伴有轻微的火花放电, 尽管这时探测器仍工作在正比区. 考虑到长时间工作的稳定性, 特别在高计数率情况下的稳定性, 我们选择每层 GEM 电极工作电压在 450V 左右, 对应的有效增益约为 10^4 . 图 13 是在此条件下分别测量的铜靶 X 射线和 ⁵⁵Fe 的 X 射线源能谱.

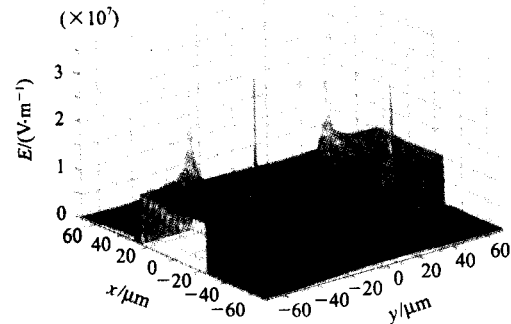


图 12 GEM 电极二维电场强度分布

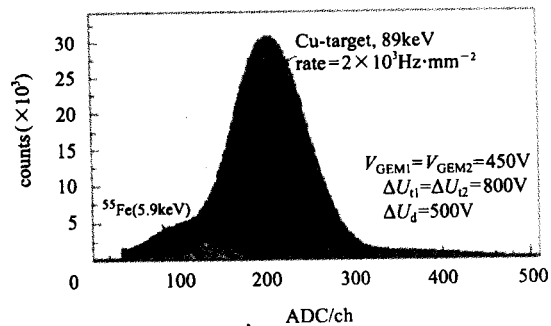


图 13 铜靶 X 射线和 ⁵⁵Fe 的 X 射线源能谱

参考文献 (References)

- 1 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 1997, A386:531
- 2 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 2003, A505:195
- 3 Altunbas C et al. Nucl., CERN-EP, 2002, 008
- 4 LI Cheng et al. Nuclear Electronic & Detection Technology, 2000, 20(5):351 (in Chinese)
(李澄等. 核电子学与探测技术, 2000, 20(5):351)
- 5 Bouianov O et al. Nucl. Instrum. Methods, 2000, A450:277-287

Gain Performance of GEM Gas Detector*

AN Shao-Hui LI Cheng¹⁾ XU Zi-Zong SUN Yong-Jie ZHOU Yi

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

Abstract A kind of double-GEM gas detector which can be used for X-ray imaging and charged particle tracking detection, is studied. The effective gain and stability properties of the double-GEM gas detector are measured by high intensive X-ray source (Cu-target, 8.9keV). The results show that the effective gain of the GEM gas detector is up to 10^4 , and the detector has a good stability properties comparing with the MWPC under the X-ray rate of $10^5 \text{ Hz} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Key words GEM(Gas Electron Multiplier), high rate, gas detector

Received 7 July 2003, Revised 8 September 2003

* Supported by NSFC (10075045)

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