

三级GEM气体探测器性能的实验研究*

来永芳^{1,3;1)} 李玉兰¹ 李元景¹ 李金^{2,1} 郑晓翠¹ 曹良俊¹

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)
2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)
3 (解放军防化指挥工程学院 北京 102205)

摘要 GEM探测器是一种新型微型气体探测器(Micro-Pattern Gas Detector),在粒子物理实验及低能X射线成像系统中有着较大的应用前景.文章研制了一种适用于低能X射线成像和带电粒子径迹测量的三级GEM气体探测器.使用放射源⁵⁵Fe对其气体放大特性、电荷传输效率及能量分辨本领等性能进行了实验研究,重点研究了传输区电场对气体有效增益和能量分辨本领的影响.实验结果表明,三级GEM探测器的暗电流和噪声较小,有效增益能够达到 10^5 以上并稳定地工作,对5.9keV的X射线能量分辨率可达24%,传输区电场强度大于3000V/(cm·atm)时,能量分辨率基本稳定在30%左右.

关键词 气体电子倍增膜 能量分辨率 有效增益

1 引言

气体电子倍增器GEM(Gas Electron Multiplier)是由欧洲核子研究中心(CERN)的F.Sauli等人于1997年发明的一种微型气体探测器^[1].与多丝正比室(MWPC)相比,GEM探测器具有计数率上限高(可达到 10^6 Hz/mm²)、位置分辨率好(采用重心法、可达到30 μ m)及信号读出模式多样等优点,在粒子物理的实验研究和低能X射线的成像系统中展现出广泛的应用前景^[2].

GEM的原材料是上、下表面覆铜的聚酰亚胺(Kapton)膜,一般铜箔的厚度在5—10 μ m范围内,而Kapton膜的厚度是50 μ m.采用挠性印刷电路的化学刻蚀方法在Kapton膜上腐蚀出间距为140 μ m、直径为70 μ m的微孔阵列就可构成GEM膜,图1(a)示在显微镜下拍摄的GEM膜^[3].给GEM膜的上、下铜箔(即GEM电极)加上一定的电压,就会在各个微孔中产生强的电场.图1(b)示所加电压为400V时,GEM膜微孔中电场的二维分布^[3],最大电场强度能够达到100kV/(cm·atm).将GEM膜与相应的漂移电极和读出电极组合在一起,就可构成GEM气体探测器.电子

通过微孔中的强电场时,自然会发生电子雪崩,从而实现电子倍增的作用.

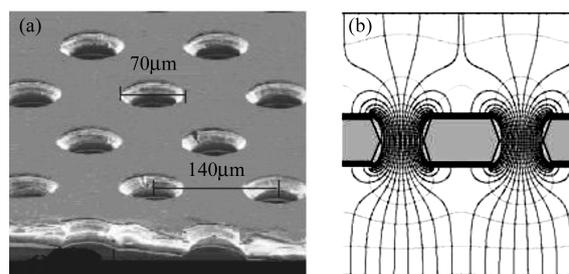


图1 (a)显微镜下的GEM膜;(b)GEM膜上、下电极的电压为400V时,微孔中电场的二维分布

单级GEM的气体放大作用是有限的,只有几十到数百倍,但可以将几个GEM级联使用,这样不仅可以大幅度提高探测器的气体增益,同时也可以大大降低GEM探测器连续放电的几率.

本文报道我们研制的有效面积为10cm×10cm的三级GEM探测器,使用放射源⁵⁵Fe对其气体放大特性和能量分辨本领等性能进行了实验研究,重点研究了传输区电场对气体有效增益和能量分辨本领的影响.

2005-10-21 收稿

* 国家自然科学基金(10575063)资助

1) E-mail: lai-yf@mail.tsinghua.edu.cn

2 三级GEM探测器基本结构

为了降低整个探测器所需的高压,实验制作的三级GEM探测器中,每级GEM之间的传输区(TRANSFER)距离较小,只有1mm.第三级GEM的放大区到收集电极之间的感应区(INDUCTION)距离也只有1mm,探测器的基本结构如图2所示.漂移电极采用的是厚度为80 μm 的覆铝Mylar膜,漂移区(DRIFT)宽度为4.5mm.读出电极采用的是厚度为0.5mm的印刷电路板(PCB),表面刻蚀出长度为100mm、宽度为3mm的读出电极条.GEM的外框由铜制成,厚度为6mm.

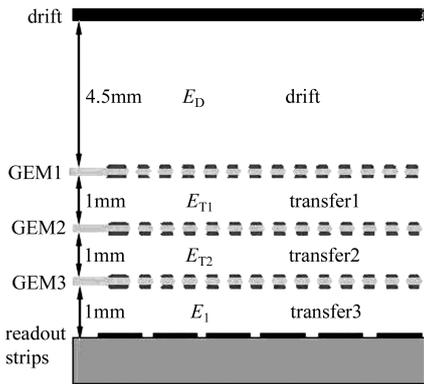


图2 三级GEM探测器的基本结构

为了给三级GEM探测器的各个电极提供电压,实验组设计了一个高压分压电路,图3示其电路原理图,漂移电极和每级GEM电极都分别接了阻值为100M Ω 的保护电阻,读出电极条通过一个阻值为200k Ω 的电阻接地.改变电阻 R_{transfer} 和 $R_{\text{induction}}$ 可以调整传输区和感应区的电场强度.

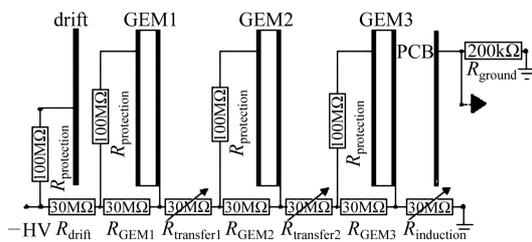


图3 三级GEM探测器高压分压电路的原理图

GEM探测器所充的工作气体是氩(Ar)与二氧化碳(CO₂)的混合气,比例是70%:30%,压强为一个标准大气压,采用流气模式.

3 性能测试结果

给三级GEM探测器提供高压的电源型号是ORTEC公司的556,最高输出电压为 $\pm 3000\text{V}$;读出电

极条所接前置放大器的型号是CANBERRA公司的2006,灵敏度为235mV/10⁶个电子-离子对;主放采用的型号是ORTEC公司的572,可调放大倍数的范围在10—1500之间;所用多道幅度分析器的型号是ORTEC公司的919E,最大道值可为8192道.

在测量三级GEM的气体放大特性和能量分辨本领时,GEM电极上所加的电压相同,感应区电场强度与传输区的亦相同,多道幅度分析器所用的最大道值为1024道.

3.1 GEM的漏电流

制作完成三级GEM探测器之后,给探测器充入氮气,用弱电流仪分别测量每级GEM的漏电流随所加电压的变化情况.结果表明,在电压低于500V时,每级GEM的漏电流均小于100pA,即绝缘电阻值大于5T Ω .

3.2 三级GEM探测器的气体放大特性

用放射源⁵⁵Fe的X射线(能量为5.9keV),结合多道幅度分析器测量三级GEM探测器读出电极收集电子信号的幅度谱就能够确定探测器的气体有效增益.图4示在传输区电场强度不同条件下,气体有效增益随GEM电极电压的变化曲线.由图可见,在GEM电极电压相同时,传输区电场越强,电子的传输效率也越高,从而提高了探测器的气体有效增益.在传输区电场强度为4kV/cm、GEM电极电压为400V时,气体有效增益可以达到 1.4×10^5 .

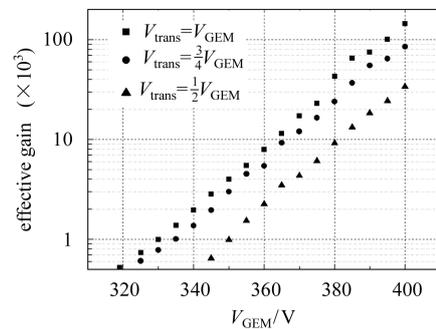


图4 气体有效增益随GEM电极电压的变化曲线

3.3 三级GEM探测器的能量分辨本领

用多道幅度分析器测量传输区电场不同情况下,三级GEM探测器对⁵⁵Fe X射线源(能量为5.9keV)的能量分辨能力.测量时,能量为5.9keV的特征X射线的峰位计数为500.

图5(a)示在GEM电极电压为370V时,传输区电场强度分别1850V/cm, 2775V/cm和3700V/cm情况

下, ^{55}Fe 5.9keV X 射线的幅度谱. 我们定义 5.9keV 的特征 X 射线的全能光电峰处的计数与光电峰和氡逃逸峰之间的谷处的计数为峰谷比. 此幅度谱显示, 传输区电场越强, 峰谷比越大. 图 5(b) 示此峰谷比随传输

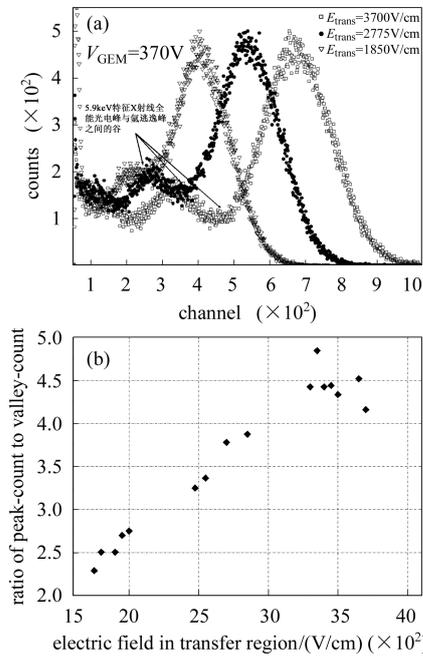


图 5 (a) GEM 电极电压为 370V 时, 传输区电场强度分别 1850V/cm, 2775V/cm 和 3700V/cm 情况下, ^{55}Fe 源的幅度谱; (b) 峰谷比随传输区电场强度的变化曲线

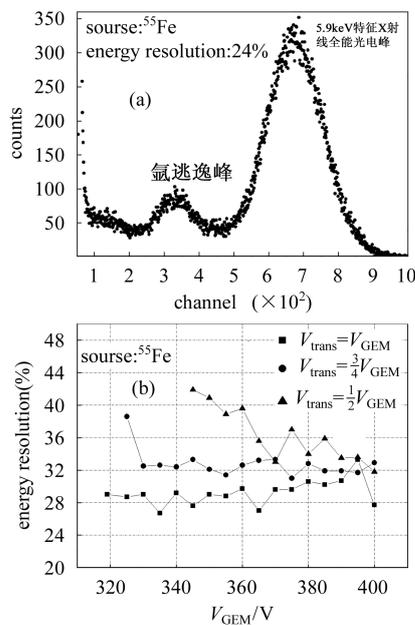


图 6 (a) GEM 电极电压为 360V、传输区场强为 3600V/cm 时, 三级 GEM 探测器测得的 ^{55}Fe 源的幅度谱; (b) 传输区电场不同条件下, 三级探测器对能量为 5.9keV 的 X 射线的能量分辨率随 GEM 电极电压的变化曲线

区电场强度的变化曲线, 可见, 当传输区电场强度在 3300V/cm 左右时, 峰谷比接近最大.

图 6(a) 示出 GEM 电极电压为 360V、传输区场强为 3600V/cm 时, 用孔径为 2mm、厚度为 3mm 的铅准直后测得的 ^{55}Fe 源的幅度谱, 此时三级 GEM 探测器的有效增益约为 8000. 结果显示, 此幅度谱中, 能量为 5.9keV 的 X 射线的能量分辨率约为 24%, 可以清晰地看到氡的逃逸峰. 图(b) 示传输区电场强度不同情况下, 三级 GEM 探测器对能量为 5.9keV 特征 X 射线的能量分辨率随 GEM 电极电压的变化曲线. 可以看出, 随着传输区电场强度的增加, 三级 GEM 探测器的能量分辨本领逐渐变好, 在传输区电场强度大于约 3kV/cm 时, 基本稳定在 30% 左右. 应说明的是, 能量分辨率的测量与放射源是否准直有关, 在做这些能量分辨率时, 没有对放射源进行很好的准直, 所以能量分辨率不太好.

4 结论

为了克服多丝正比室在高计数率和高位置分辨方面的限制, 基于微电子技术的新型微型气体探测器, 如微条气体探测器 (MSGC)、微间隙气体探测器 (MGCF) 等在近二十年里得到了迅速的发展, 但这些探测器的放大倍数小于多丝正比室的, 而且工作在高增益时, 易出现打火, 影响其工作稳定性^[4]. GEM 探测器具有特殊性, 一方面, GEM 膜的制作采用的是挠性印刷电路的生产工艺, 可以大面积加工; 另一方面, GEM 膜只起着实现电子雪崩的作用, 因此, 可以根据实际需要而选择合适的读出电极. 实验证明, 对于三级 GEM 探测器, 在工作气体为 Ar (70%) 与 CO₂ (30%) 的混合气, GEM 电极电压约为 400V 时, 气体有效增益能够达到 10⁵. GEM 探测器的有效增益在一定电压范围内线性较好, 并与传输区的电场关系密切, 传输区电场越大, 电子的传输效率越高, 因而提高了气体有效增益. 实验结果也表明, 对于 ^{55}Fe 源的特征 X 射线 (能量为 5.9keV), 三级 GEM 探测器的能量分辨率可以达到约 24%. 同样, GEM 探测器的能量分辨本领也与传输区电场有关, 在传输区电场强度大于约 3kV/cm 时, 能量分辨率基本不变.

非常感谢欧洲核子研究中心 (CERN) Fabio Sauli 教授提供的 GEM 膜和在研究工作中给予的大量指导, 同时对清华大学工程物理系岳骞和王义两位老师在实验中给予的热情帮助表示衷心的感谢.

参考文献(References)

- 1 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A386**: 531
- 2 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A522**: 93
- 3 <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- 4 LI Jin. Nuclear Electronic & Detection Technology, 2001, **21**(2): 154 (in Chinese)
(李金. 核电子学与探测技术, 2001, **21**(2): 154)

Experimental Study on the Performance of Tri-GEM Gas Detector^{*}

LAI Yong-Fang^{1,3;1)} LI Yu-Lan¹ LI Yuan-Jing¹ LI Jin^{2;1}
ZHENG Xiao-Cui¹ CAO Liang-Jun¹

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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

3 (Institute of Chemical Defense, P.L.A, Beijing 102205, China)

Abstract GEM gas detector is a type of Micro-pattern gas detectors, which has a wide potential in particle physics experiment and lower energy X-ray imaging system. In this paper a tri-GEM gas detector was developed, and the gas gain, energy resolution and charge transfer efficiency of the tri-GEM detector were studied with source of ⁵⁵Fe. The results of the test indicate that more than 10⁵ effective gain and about 24% energy resolution of 5.9keV X ray of the tri-GEM detector can be reached. The results also show that when the electric field in transfer region is more than 3kV/(cm-atm), the best energy resolution of the tri-GEM detector can be obtained.

Key words GEM foil, energy resolution, effective gain

Received 21 October 2005

^{*}Supported by NSFC (10575063)

1) E-mail: lai-yf@mail.tsinghua.edu.cn