

文章编号: 1007-4627(2015)03-0335-06

高通量下 GEM 探测器高压供电模式研究

魏堃^{1,2,3}, 祁辉荣^{2,3}, 张余炼^{1,2,3}, 温志文^{1,2,3}, 张建^{2,3}, 欧阳群^{2,3}, 张小东^{1,4}

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

2. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;

3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

4. Department of Nuclear engineering, University of Tennessee, TN 37996, USA)

摘要: GEM 探测器的供电一般采用电阻链分压供电模式和多路分立供电模式, 在低通量 X 射线下测量时区别不大, 但是在高通量 X 射线时, 电阻链分压供电模式会带来饱和效应引起工作电压的变化, 造成探测器工作不稳定。本研究在高通量 X 射线照射下, 研究了有效面积为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 三层级联 GEM 探测器的有效增益(稳定性)与不同高压供电模式的关系。通过测量不同分压电阻值(1, 2, 5 到 $30\text{ M}\Omega$)的实验研究, 发现随着 X 射线通量的增加, 在电阻链分压供电模式下, 出现了 GEM 探测器感应电极的读出电流饱和趋势, 分析了可能导致饱和效应出现的原因。结果表明, 当入射 X 射线在探测器上的有效吸收剂量不断增加时, 电阻链供电模式需要调整分压单元电阻值, 或者采用多路分立供电模式, 从而避免因饱和效应引起的 GEM 探测器有效增益的变化, 实现探测器稳定的工作状态。

关键词: GEM 探测器; 高压供电模式; X 射线; 高剂量

中图分类号: TL811 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.335

1 引言

GEM(Gas Electron Multiplier) 探测器是一种微结构气体探测器, 由欧洲核子中心(CERN)的 Sauli 等^[1]在 1997 年开发研制。标准 GEM 膜是双面覆铜且双锥形通孔呈均匀分布的 Kapton 膜, 其中 Kapton 膜厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 铜箔厚度为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 双锥形孔间距 $140\text{ }\mu\text{m}$, 孔表面直径 $70\text{ }\mu\text{m}$ 以及孔心直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。当在上下两层铜箔上加一定电压, 会在孔中形成很强的电场($> 100\text{ kV/cm}$), 电子穿过小孔时在强电场的驱动下会在工作气体中倍增放大。单层 GEM 膜的增益在 $20 \sim 50$ 范围内, 级联多层 GEM 膜可以达到 10^4 。由于 GEM 探测器具有高计数率、高增益、抗辐照等优点, 使得 GEM 探测器不仅在高能粒子探测领域, 而且在同步辐射衍射成像等方面都有广泛的应用^[2]。

本文研究使用的三层 GEM 膜构成的探测器有效面积为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 探测器结构从上到下依次由漂移极板、三层 GEM 膜和收集极板组成。漂移区和收集区的电场为 $1 \sim 3\text{ kV/cm}$, 以防止电子和正离子的复合,

从而降低电子的收集效率。由于单层 GEM 在高增益下会出现明显的放电问题, 因此一般采用三级级联 GEM 探测器将电子增益负荷分给三个 GEM 膜, 这样既增加了探测器的增益, 又降低了打火率, 即增加了稳定性。目前广泛采用的级联 GEM 探测器的供电模式主要有两种: 多路分立高压供电模式和电阻链分压供电模式^[3]。其中多路分立高压供电一般至少需要七路独立的高压引出, 较为繁琐, 而且在工作高压加载的过程中需要严格按照对应电极的关系, 以一定的电压步长($\sim 5\text{ V}$)进行工作高压加载, 这种高压供电模式由于易于配置, 常在调试期间采用。而电阻链分压供电模式仅采用一路的高压供电, 非常简便, 而且电极连接采用焊接形式顺序不易出错, 工作高压的加载通过电阻链分压完成, 安全可靠。本文研究在高通量 X 射线照射下, 电阻链分压供电模式对探测器增益的影响。研究发现, 在电阻链分压供电模式下, 随着入射 X 射线通量的增加, GEM 探测器感应电极的读出电流出现饱和趋势。该饱和效应是一种非线性现象, 在高通量的入射 X 射线照射下, 使得探测器不能正常工作, 且使得后续数据处理变得复杂。所

收稿日期: 2014-10-02; 修改日期: 2014-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(11275224)

作者简介: 魏堃(1991-), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: weik@ihep.ac.cn

通信作者: 祁辉荣, E-mail: qihr@ihep.ac.cn.

以，为使探测器稳定并高性能工作，需研究和分析高通量入射条件下，级联 GEM 探测器高压供电模式的选用原则和解决方案。

2 GEM膜本征电阻

GEM 膜的漏电流是 GEM 膜性能优劣的一个关键指标。GEM 膜的漏电流越小性能越好，在高增益下出现打火的几率越小，所以探测器在组装前需测量 GEM 膜的漏电流，下面给出具体测量方法。

首先，将待测量的 GEM 膜放置于密闭气室中，通入氮气(纯度为 99.999%)，气流量控制在 20 mL/min。密闭气室中工作气体置换 6 个等效体积后，在 GEM 膜上、下表面加载高压测试漏电流。测试高压范围从 0 到 500 V，电压步长为 50 V。漏电流测量采用美国 KEITHLEY 公司的弱电流静电计(型号 6517B)。GEM 膜的等效电阻利用公式 $R = V/I$ 给出。利用上述方法系统地测量了三张 GEM 膜的等效电阻： R_{g1} ， R_{g2} ， R_{g3} ，结果如图 1 所示。从图中可以看出，随着 GEM 膜上的电压增加，等效电阻值也随之下降。每张膜由于制作刻蚀工艺的影响，漏电流测量结果有一定的差异，当 GEM 膜上的所加电压为 400 V 时，三张 GEM 膜的等效电阻值均大于 500 GΩ(漏电流均 < 1 nA)。

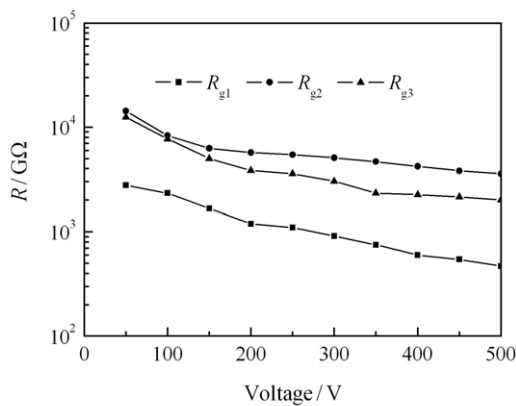


图 1 GEM 膜等效电阻随高压变化关系

GEM 膜的等效电阻值随着电压的升高而变小是由于每个微孔上的电场的不断改变引起。GEM 膜在微孔处不再是绝缘的 Kapton 材料，而是以氮气充当介质。氮气在高电场的作用下部分电离，在 GEM 膜微孔中形成微小的电流，从而导致 GEM 膜的等效电阻降低。在实际的 X 射线的测量中，随着 X 射线通量的增加，GEM 膜孔中穿过的倍增电子数会不断增多，即电流增大，从而使得 GEM 膜等效电阻变小，即由具有几千 GΩ 等效电阻向几百 GΩ 甚至更小的等效电阻变化。

对于三层 GEM 探测器，相较于上两层，最下层 GEM 膜等效电阻变化最大，这是 GEM 膜的一个本征特性。

3 不同高压供电模式

3.1 多路高压供电模式

图 2 是一个典型的多路分立高压供电模式的示意图。这种供电模式需引入 7 路独立高压，分别与漂移极，GEM₁，GEM₂ 和 GEM₃ 上下膜表面连接。其中 HV₁ ~ HV₇ 调节互不干扰，为避免不对称的高压对 GEM 膜造成的损坏，在升和降高压时要保证电压步长为 5 V。上文分析中 GEM 膜的本征电阻值会随着 GEM 膜两端所加电压的增大而变小，而电流随之升高，所以加在 GEM 膜上的高压的功率要足够补偿 GEM 膜因电流变化而引起的功率变化，保证 GEM 性能的稳定和多路分立供电的稳定。实验中多路高压供电模块选用的 CAEN 的 Mod.SY127 高压电源^[4]。该电源根据需要可配置 1 ~ 10 个模块、4 ~ 40 个通道。Mod.SY127 高压模块的型号不同，对应参数也不相同。对于多路高压供电的三层 GEM 探测器，需 2 个模块(7 个通道)，选用型号为 A332 的负高压模块，其最大输出电流可达 1 mA。

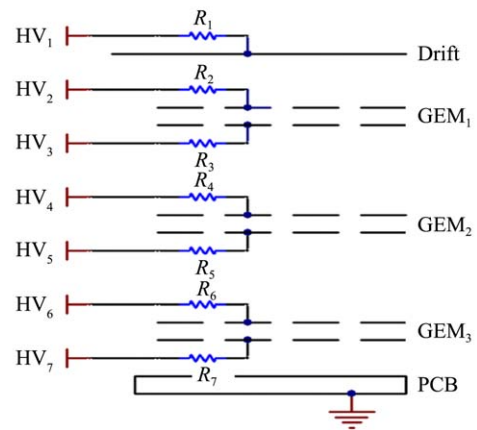


图 2 (在线彩图) 独立高压供电模式示意图

3.2 电阻链高压供电模式

图 3 所示为一个典型的电阻链分压供电模式。从图中可以看出在该供电模式下，电源只需输出一路高压，被分压电阻链上的 R_1 到 R_7 七个电阻分成七路高压，分别与漂移极、GEM₁、GEM₂ 和 GEM₃ 膜的上下表面连接。这种高压供电模式的特点是有利于系统集成以及小型化。与七路独立高压供电模式相比，电压升降简单、安全易用，只需要考虑输入高压升降速度而不必考虑升高压、降高压中 GEM 工作区高压改变幅度。为保证分

压的一致性，电阻链在组装前需要对分压电阻阻值的一致性进行选择，测量所得电阻阻值与分压电阻标称值之间的差值不能超过1%，此外为避免GEM膜在高增益下放电被击穿短路后，分压电阻链上电压重新分配导致工作高压升高损坏其余GEM膜的可能性，会给GEM膜串联一个保护电阻，称为电阻链保护电阻分压供电模式。实际测量中GEM膜出现放电被击穿短路的可能性很小，因此未采用该模式。对于简易小型化的电阻链分压供电模式，实验中选用ISEG-SHQ双通道高压桌面电源。

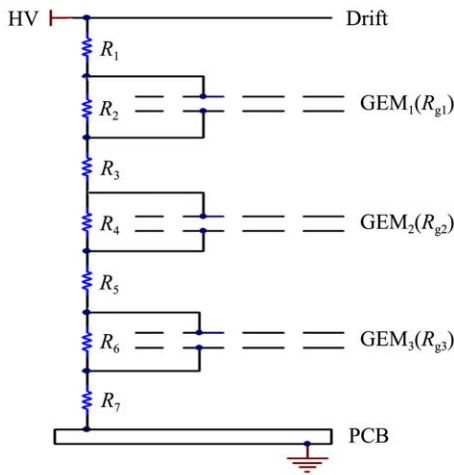


图 3 (在线彩图) 电阻链分压供电模式示意图

4 高通量下分压供电模式测量分析

4.1 吸收剂量计算和有效增益

X光机或者放射源出射一定能量和通量的X射线在探测器中与工作气体发生相互作用，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；而电子则在漂移电场作用下，向下漂移，其中大部分进入GEM膜的孔中发生雪崩放大。经过三级GEM级联放大后，电子由感应电极电路板收集，给出感应信号(或电流)。利用测量到的信号(或电流)和探测器有效增益即可计算出原初电离的电子数以及X射线的通量。如果对一定的时间积分，还会给出探测器对X射线的吸收剂量。

利用KEITHLEY6517B观测读出电极的感应电流 I ，可以得到读出电极的感应电荷数，即探测器中倍增电子数约为

$$N_e = \frac{I}{e}, \tag{1}$$

其中： e 为元电荷，若探测器的增益为 G (即三层GEM膜的总增益)，则X射线在探测器中产生的原初电离电子数

$$N_p = \frac{N_e}{G} = \frac{I}{1.602 \times 10^{-19} G}, \tag{2}$$

N_p 为原初电离数，在 t 时间内，探测器对入射X射线的吸收剂量可以估算为

$$D = \frac{dE}{dm} = \int_0^t \frac{N_p \times 26.2 \text{ eV}}{dm} dt. \tag{3}$$

对于X射线，吸收剂量 D 在数值上等于当量剂量 H [5]。其中， dE 为入射X射线在工作气体中沉积的能量， dm 为接受辐照的气体质量，26.2 eV为X射线与Ar气相互作用产生一对电子离子对所需要的最小平均电离能。

探测器的增益 G 是联系原初电离电子数与读出电极感应电流的一个关键因子。探测器增益测量选用⁵⁵Fe(5.9 keV的X射线)放射源，工作气体是Ar和CO₂混合气体，比例分别为70%和30%。同时改变三层GEM膜上所加的电压值，读出信号经过前放(ORTEC142IH)、主放(ORTECPC572A)、输入到多道分析器(ORTEC918)中，用多道获取相应的能谱，记录全能峰对应的多道的道值 D ，然后计算对应的增益[6]。得到GEM探测器的增益与三层GEM膜上所加电压值之和的关系如图4所示，从图中可以看出，GEM探测器的增益随三层GEM膜上所加总电压的增大呈指数增长。

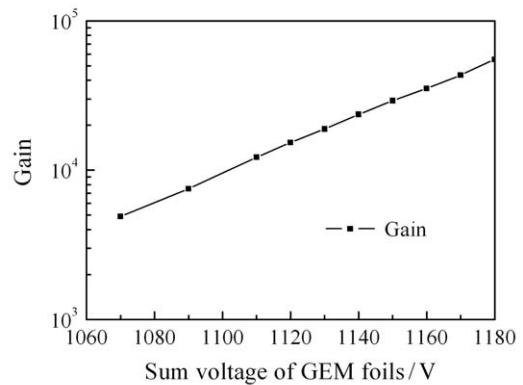


图 4 增益与三层GEM膜所加电压关系

4.2 高通量测量装置

测量探测器读出电极的感应电流，采用有效面积100 mm×100 mm的三级GEM探测器，探测器采用电阻链分压供电模式。探测器的结构从上往下依次为漂移电极(Cathode)、GEM₁、GEM₂、GEM₃和感应电极(Anode)，这5个极板将探测器气室分为4个区域，依次为漂移区、第一传输区、第二传输区和收集区，其间隙分别为8, 2, 2和2 mm。测试过程中，GEM探测器使用的工作气体是Ar和CO₂混合气体，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，测量时的气流量为 100 mL/min。

实验中选用日本滨松公司的微聚焦 X 光机 L9631，属于内嵌式 X 射线系统，其特点是高输出率、高稳定性，且操作简单。X 光机管电压范围为 0~40 kV，管电流范围为 10~800 μA，在 X 光机管电压一定的情况下，X 光机管电流越大，X 射线的入射通量越大。X 光机与探测器之间的距离为 950 mm，全面积入射 X 射线，足够远的距离可以使得探测器的有效接受面积入射的 X 射线相对均匀，实验过程中未有使用滤片硬化 X 射线。读出电极感应电流的监测系统选用静电计 6517B，高压源选用 ISEG-SHQ 双通道高压电源。

4.3 高通量下的饱和效应

当 GEM 膜所加总电压为 1080 V，X 射线全面照射及 X 光机管电压为 40 kV 时，测量不同分压电阻下读出电极感应电流随 X 光机管电流变化关系图，结果如图 5 所示。从图中可以看出，随着分压电阻值增大，读出电极感应电流随 X 光机管电流的增加呈现出不断增大的饱和趋势，这种现象称为“饱和效应”。

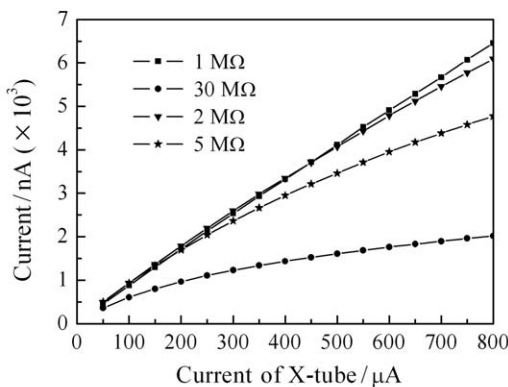


图 5 不同分压电阻下的测量结果

根据 GEM 膜等效电阻与 GEM 膜上所加电压关系可知(图 1)，在分压电阻值很大，且 GEM 膜上所加电压也很大的情况下，GEM 膜等效电阻值与分压电阻值趋近，且随着 X 射线入射剂量的增加，GEM 膜内电流也增大，从而导致 GEM 膜等效电阻下降，GEM 膜等效电阻与分压电阻并联的电阻值小于分压电阻值，电阻链上电压重新分配，加在 GEM 膜上的电压相对变小，GEM 膜的增益也随之变小，所以读出电极感应电流变小，这是出现“饱和效应”的主要原因。

4.4 实验结果分析

电阻链高压供电模式下三层 GEM 探测器等效电路图如图 3 所示，GEM 膜等效电阻分别为 R_{g1} 、 R_{g2} 、

R_{g3} 。三层 GEM 膜上所加电压分别为 ΔV_{g1} 、 ΔV_{g2} 、 ΔV_{g3} ，GEM 膜上所加总电压 $V_g = \Delta V_{g1} + \Delta V_{g2} + \Delta V_{g3}$ ， $R_1 \sim R_7$ 为分压电阻，实验中 $R_2 = R_4 = R_6$ 。当分压电阻为 1 MΩ 时，未出现“饱和效应”，探测器正常工作。对照图 4 增益与电压关系图，当三层 GEM 膜上所加总电压 V_g 为 1080 V，探测器的增益约为 6000。利用图 5 分压电阻为 1 MΩ 时，读出电极感应电流随 X 光机管电流变化关系算出对应的原初电离数与 X 光机管电流的关系。再利用读出电极感应电流与原初电离数之间关系 [公式 (2)] 算出分压电阻分别为 2, 5, 30 MΩ 时增益随 X 光机管电流变化曲线图，如图 6 所示。从图中可以看出当分压电阻为 2, 5, 30 MΩ 时，当 X 光机管电流增大到某值时，探测器的增益发生变化，探测器不能正常工作：当分压电阻为 2 MΩ 时，直到 X 光机管电流为 500 μA 时，探测器的增益才有变化，探测器增益在 X 光机管电流增加到 800 μA 时减小为 5658；当分压电阻为 5 MΩ，探测器的增益在 X 光机管电流为 100 μA 时开始变化，探测器增益在 X 光机管电流增加到 800 μA 时减小为 4435；当分压电阻为 30 MΩ 时，探测器的增益在 X 光机管电流为 50 μA 时开始变化，探测器增益在 X 光机管电流增加到 800 μA 时减小为 1875。

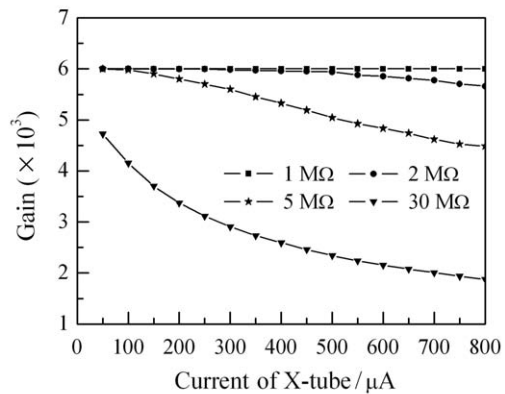


图 6 增益与电阻关系

根据增益与电压关系(图 4)，可以计算出随着增益的降低，三层 GEM 膜上所加电压和的改变，结合公式(3)可以由以上结果计算出电压的改变与入射 X 射线引起的探测器的吸收剂量之间的关系。图 7 是分压电阻分别为 1, 2, 5, 30 MΩ 时，三层 GEM 膜上所加电压和 V_g 随探测器吸收剂量变化关系。当分压电阻为 1 MΩ 时， V_g 几乎不随探测器吸收剂量的改变而改变；当分压电阻为 2 MΩ 时， V_g 变化很小，直到探测器吸收剂量为 312.2 mSv·h⁻¹ 时， V_g 才有明显变化， V_g 随原探测器吸收剂量的增大而减小，当探测器吸收剂量增加到 686.7 mSv·h⁻¹ 时 V_g 减小 9 V；当分压电阻为 5 MΩ

时, V_g 在探测器吸收剂量为 $182.5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 时开始有明显变化, V_g 在探测器吸收剂量增加到 $686.7 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 电压减小 17 V ; 当分压电阻为 $30 \text{ M}\Omega$ 时, V_g 在探测器吸收剂量为 $48.5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 时就开始有很大变化, 当探测器吸收剂量到 $686.7 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 变化值最大可以达到 60 V 。

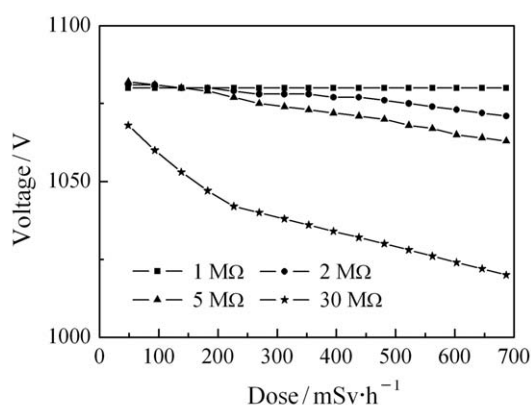


图7 电压与探测器吸收剂量关系图

5 结论

本文比较了两种高压供电模式的优点和不足, 在高通量 X 射线工作条件下, 利用电阻链分压供电模式测量了三层级联 GEM 探测器的感应电流。发现了 GEM 膜的本征电阻和电阻链阻值随着探测器吸收剂量增大而趋近, 引起电阻链分压值和 GEM 膜上所加电压的改变, 使得探测器不能正常工作。

分析结果表明, 有效面积为 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ 三层级联 GEM 工作增益为 6000 时, 当探测器有效吸收剂量在 $48.5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上, 使用 $30 \text{ M}\Omega$ 以上的分压电阻测量时会带来较大的工作高压变化, 应使用更低的分压电阻值; 当探测器有效吸收剂量在 $182.5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下, 1, 2, 5 $\text{M}\Omega$ 的分压电阻可以实现探测器的稳定工作; 当探测器有效吸收剂量在 $312.2 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上, 电阻链供电模式需要考虑使用小于等于 $1 \text{ M}\Omega$ 的分压电阻值, 或者采用多路分立供电模式对级联 GEM 膜供电。在高剂量 X 射线的测量中, 为使得探测器稳定工作, 无论标准 GEM、厚 GEM 还是 Micromegas 气体探测器都需要考虑供电模式的选择。

参考文献:

- [1] SAULI F. GEM: Nucl Instr Meth A, 1997, **386**: 531.
- [2] BACHMANNA S, BRESSANA A, CAPEANSC M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2002, **479**: 294.
- [3] CORRADI G, MURTAS F, TAGNANI D. Nucl Instr Meth A, 2007, **572**: 96.
- [4] CERN.Mod.SY127 HIGH VOLTAGE SYSTEM.[EB/OL].[2014-07-18]. http://www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen_sy127.pdf.
- [5] WEI Zhiyong. Radiation metrology [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1997: 219. (in Chinese)
(魏志勇. 辐射计量学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997: 219).
- [6] DONG Liyuan, QI Huirong, LI Yuhong, *et al.* Nuclear Physics Review, 2012, **29**(4): 379. (in Chinese)
(董丽媛, 祁辉荣, 李玉红. 原子核物理评论, 2012, **29**(4): 379.)

Investigation of HV Power Supply for GEM Detector in High Dose Rate

WEI Kun^{1,2,3}, QI Huirong^{2,3}, ZHANG Yulian^{1,2,3}, WEN Zhiwen^{1,2,3}, ZHANG Jian^{2,3},
OUYANG Qun^{2,3}, ZHANG Xiaodong^{1,4}

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

2. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China;

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

4. Department of Nuclear engineering, University of Tennessee, TN 37996, USA)

Abstract: There are two methods of the HV power supply for the GEM detector. One is a HV channel divided by the resistive chain and the other is the several separate HV channels. In the smaller dose rate of X-ray, all of the methods are similar. When the dose rate increases, the resistive chain-dividing mode has more obvious saturation effect and the working voltage of the GEM detector is unstable. In the paper, a GEM detector with an effective area of 100 mm×100 mm has been studied in the high dose rate using X-tube. The unit values in the divider resistance chain are set to 1, 2, 5 and 30 MΩ respectively in the test. With the resistive chain-dividing mode, the readout current of the GEM detector's anode tends to saturate when the dose rate of X-ray increases, and the reasons of the saturation effect are analyzed. The results indicate that the effective absorbed dose of X-ray by the triple GEMs detector reaches to the specific value and the divider resistance needs to re-select, even the several separate HV channels mode should be considered. It will keep the constant of the working voltage of the GEM detector without the saturation effect and gain variation and the performance of GEM detector is stable.

Key words: GEM detector; high voltage power supply method; X-ray; high dose rate

Received date: 2 Oct. 2014; **Revised date:** 9 Nov. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11275224)

Corresponding author: QI Huirong, E-mail: qihr@ihep.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>