

基于复合结构的气体电子倍增器增益模拟和实验研究

张余炼 祁辉荣 胡碧涛 温志文 王海云 欧阳群 陈元柏 张建

Measurement and simulation of the hybrid structure gaseous detector gain

Zhang Yu-Lian Qi Hui-Rong Hu Bi-Tao Wen Zhi-Wen Wang Hai-Yun Ouyang Qun Chen Yuan-Bo
Zhang Jian

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 142901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.142901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.142901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于阻性阳极读出方法的气体电子倍增器二维成像性能

[Study of the two dimensional imaging performance for the gas electron multiplier using the resistive anode readout method](#)

物理学报.2017, 66(7): 072902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072902>

二维多丝室探测器读出方法的优化

[Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber](#)

物理学报.2017, 66(7): 072901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072901>

一维丝室气体探测器衍射像差的修正方法研究

[Modified method for diffraction aberration of one-dimensional wire chamber](#)

物理学报.2015, 64(8): 082901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.082901>

高增益型气体电子倍增微网结构探测器的性能研究

[Study on the performance of a high-gain gas electron multiplier-MicroMegas chamber](#)

物理学报.2013, 62(12): 122901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.122901>

micro-bulk 工艺 micromegas 的研究

[The study of micro-bulk micromegas](#)

物理学报.2012, 61(9): 092901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.092901>

基于复合结构的气体电子倍增器增益模拟和实验研究*

张余炼¹⁾²⁾³⁾ 祁辉荣^{2)3)†} 胡碧涛^{1)2)‡} 温志文¹⁾²⁾³⁾ 王海云²⁾³⁾⁴⁾
 欧阳群²⁾³⁾ 陈元柏²⁾³⁾ 张建²⁾³⁾

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) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年3月16日收到; 2017年4月24日收到修改稿)

气体电子倍增器(GEM)作为高性能的微结构气体探测器在高能物理相关领域内得到了广泛的研究和应用. 其中增益是GEM探测器基本性能研究中的一个重要参数, 该值的精确测量至关重要. 增益的测量一般采用电流测量或者能谱测量方法, 但均存在精度较低或者过程繁琐的问题, 且无法精确测量低增益值. 针对GEM探测器增益的精确测量, 本文提出了一种由GEM探测器与微网结构气体探测器(MM)级联构成的复合结构探测器(GEM-MM). 利用GEM-MM结构以相对方法实现GEM增益的精确测量. 该方法既可以省去传统方法中复杂的电子学标定过程, 同时不需要进行原初电离电子数的估算, 保证了增益的精确测量, 并且可以实现GEM低增益的测量. 基于GEM-MM测量GEM增益的原理, 本文首先对GEM-MM电荷输运过程进行了模拟研究, 优化了合适的工作电压. 比较了三种不同类型和配比工作气体下GEM增益模拟结果, 并在Ar/iC₄H₁₀(95/5)气体中测量了单层GEM在3—24范围内的有效增益. 不同Penning系数下GEM增益的模拟结果表明, Penning系数为0.32时GEM增益的模拟结果与实验测量结果符合得很好. 由此可以确定一个大气压下的Ar/iC₄H₁₀(95/5)气体中, Penning系数为 0.32 ± 0.01 .

关键词: 气体电子倍增器, 微网结构气体探测器, 增益

PACS: 29.40.Cs

DOI: 10.7498/aps.66.142901

1 引言

气体电子倍增器(gas electron multiplier, GEM)^[1]是一种高精度分辨的微结构气体探测器, 由Sauli于1997年提出. 此后, 国内外对GEM开展了大量研究, 促进了其在不同领域的应用^[2]. 由于它所具有的高位置分辨率($<70 \mu\text{m}$)^[3]、优秀的能量分辨(10%)^[4,5]、可以在高计数率下长时间

稳定工作^[6]以及易于制作安装的特性. GEM技术正在研究用于高能物理实验中, 例如直线对撞机时间投影室(LCTPC)、紧凑型 μ 介子螺线管探测器(CMS)以及大型离子对撞机实验等^[7-9]. GEM膜是双面覆铜的聚酰亚胺(Kapton)膜, 膜上刻蚀出贯穿的微孔结构(孔径 $70 \mu\text{m}$, 孔间距 $140 \mu\text{m}$). 在GEM膜两侧铜电极上加上合适的电压差, 微孔内会形成高强的电场($30-50 \text{ kV/cm}$). 一般以单层或者多层级联的GEM膜作为倍增电极, 在膜的

* 国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项(批准号: 2016YFA0400400)、国家自然科学基金(批准号: 11675197)和中国科学院高能物理研究所创新基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjhr@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: hubt@lzu.edu.cn

两侧设置漂移极和读出极, 密闭在工作气体(一般为惰性以气体为主的混合气体)环境中构成探测器. 单层GEM探测器结构如图1(a)所示. 漂移极与GEM膜之间为漂移区, GEM膜与读出极之间为感应区. 保持漂移区以及感应区电场方向与孔内电场方向相同. 带电粒子在漂移区与气体介质电离产生的原初电离电子, 在电场作用下向GEM微孔内运动, 在孔内的强场中发生雪崩倍增. 倍增后大量的电子离开GEM膜到达下一级的倍增电极或者被收集到读出电极, 最终由读出电子学读出. 为保证GEM的稳定性, 单层GEM膜的增益通常在几十到几百左右, 在实际应用中需要级联多层

的GEM膜以获取高的增益. 微网结构气体探测器(micro-mesh gaseous structure, MM)^[10]是另外一种被广泛研究的微结构气体探测器, 由Saclay实验室于1996年提出. MM探测器的结构较GEM更为简单, 包括漂移极、读出极和金属丝网, 如图1(b)所示. 金属丝网与读出极之间的区域为雪崩区, MM工作时雪崩区电场强度约为30 kV/cm. 原初电离电子产生于漂移极与金属丝网之间的漂移区, 在电场作用下穿过金属丝网到达雪崩区. 为保证雪崩区距离的均匀, 金属微网与读出PCB之间为支撑柱结构. 倍增后的电子被读出极收集读出.

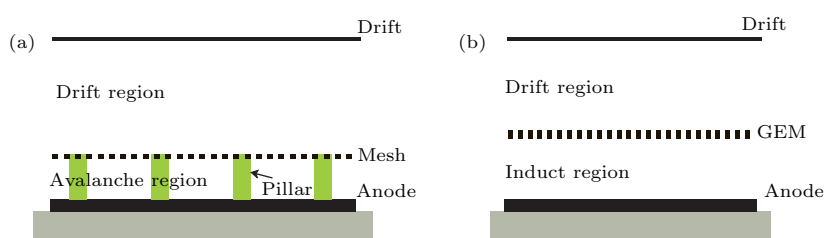


图1 探测器结构示意图 (a) MM; (b) 单层GEM
 Fig. 1. Diagram of the Micromegas and GEM detectors: (a) Micromegas detector; (b) single GEM detector.

气体探测器的增益即气体的放大倍数是探测器的一个重要参数. 其中包括以各种方式(气体对电子的吸附以及GEM膜对电子的吸收等)损失从而未能被读出电极收集的电子. 以GEM探测器为例, 根据气体放大机制理论^[11], 在一定范围内, GEM的增益随极电压差的增大呈指数上升. 通过增益与电压关系的测量可以确定优化的工作电压范围. 传统方法通过对读出电极上平均电流的测量确定GEM的增益^[12]. 例如在X射线入射时, 产生的原初电离电子数、X射线计数率以及增益之间的乘积与读出电极上的电流大小成正比. 该方案中需要精确测量电流大小, 而通常电流是很小的. 例如在⁵⁵Fe X射线源照射下, 电流通常约为nA量级. 因此实现高精度的电流测量比较困难. 实际测量中, 此方法适用于在高通量的X光照下(例如X光机)的增益测量. 还可以采用前置放大器加主放大器的方案实现电荷测量, 但需要进行放大器的标定, 确定其输出电压与输入电荷的关系. 这两种方案都需要计算原初电离电子数. 气体产生一对电子离子对所需的平均能量为气体的平均电离能(如氩气中约为26 eV), 根据带电粒子在气体中的能量损失由实验测量得到. 混合气体中的平均电离能为按

气体体积百分比计算的平均值, 因此根据平均电离能计算原初电离电子数会带来较大误差(氩气中为10%)^[13]. 增益为电子经过GEM放大前后的电子数的比值, 无论以何种方式测量增益, 估算原初电离电子数带来的误差都是不可避免的问题. 此外, 由于测量电子学对信噪比的要求, GEM需要有较高的增益. 这就导致在低增益下GEM增益的测量十分困难.

另外一种GEM增益的测量方案是利用GEM与其他电子放大结构级联实现的相对测量方法. 对GEM与微条气体室(MSGC)级联^[14], 及GEM与平面微间隙探测器(PMGC)级联^[15]的研究表明, 级联后探测器总的增益显著低于GEM增益与MSGC或者PMGC增益的乘积. 这是因为MSGC以及PMGC的阴极和阳极同为同一平面上的左右结构, 其阴极和阳极上不同的电压导致GEM与它们之间传输区电场不均匀, 整体场强降低. 导致GEM膜的电子出孔率降低, 从而使级联探测器的增益显著下降. 此外MSGC与PMGC的微电极附近电子倍增累积的空间电荷效应也是增益下降的一个重要原因. 而且MSGC以及PMGC极易受到打火影响而损伤. 为避免传统测量方法和相对测量方法的

问题, 本文介绍了一种 GEM 结合 MM 的复合结构 (GEM-MM) 测量 GEM 增益的方案. 这种结构利用了 GEM 膜电子倍增放大与读出电极相互独立这一特性, 将 GEM 膜级联于 MM 的金属微网与漂移电极之间 (参见图 1). 因为位于读出极与 GEM 膜之间的 MM 微网为平面结构, 且微网与读出极为上下结构. 只需在微网上加合适的电压就可以实现对其两侧区域电场的控制. 改变 MM 工作电压时, MM 与 GEM 之间的传输区电场不受影响. 通过优化 GEM 以及 MM 的工作电压, 在 GEM 增益很低时 (<10) 也可以容易地区分出 MM 的增益以及 GEM 的增益. 而在 MM 中电子倍增发生在雪崩区的均匀空间内, 空间电荷效应影响很小^[16]. 因此 GEM-MM 结构较之前提出的 GEM 与其他探测器级联的结构有明显优势. 尤其是在 GEM 增益较低情况下, 通过增加 MM 的增益, 采用相对方法能够有效地测量 GEM 增益并保证一定的测量精度. GEM-MM 结构还可以降低打火率的同时提高 MM 的增益^[17], 研究表明这种复合结构有效地提高了整体探测器的增益, 同等增益下显著降低了打火率, 且没有出现 GEM-MSGC 以及 GEM-PMGC 结构中增益降低的现象.

下文中首先介绍利用有限元分析软件以及 Garfield++ 程序对 GEM-MM 探测器的模拟研究结果; 通过比较探测器中各部分区域场强及工作电压对电子在各个电极上的收集比例的影响, 优化选择了 GEM-MM 合适的工作电压; 同时模拟了 GEM 探测器在不同气体中的增益, 并进行了比较; 实验部分介绍了该方法测量 GEM 增益的原理以及实验测量装置, 随后给出了 GEM 增益的实验测量结果以及误差分析, 最后对 GEM 增益测量的实验结果与模拟结果进行了对比, 并确定了 Ar/iC₄H₁₀(95/5) 气体的 Penning 系数.

2 模拟研究

2.1 建模及模拟方法

模拟采用的主要工具是 Garfield++ 程序^[18], 它是对气体探测器精确模拟的专用程序. 利用 Garfield++ 可以计算并绘制静电场、电子和离子在气体中的运动以及计算读出电极上的感应信号. 气体中电荷的运动依赖于探测器的电场配置, 因

此电场计算是 Garfield++ 模拟研究的基础. 但是 Garfield++ 本身只能处理简单的二维电场的计算问题, 针对微结构的 GEM 电场计算需要采用专用的电场计算软件. 模拟中采用了开源的有限元分析和计算程序 Gmsh^[19] 和 Elmer^[20]. Gmsh 可以进行探测器的几何建模和网格划分. GEM-MM 结构的模型建立如图 2(a) 所示. 漂移区距离为 4 mm, GEM 膜与金属网之间的传输区距离为 1.4 mm. 图 2(b) 所示为 GEM 探测器的模型, 模拟中漂移区间距及感应区间距均为 1 mm. Elmer 通过读取 Gmsh 的网格划分进行电场的计算. 由于模拟中探测器建模为选取的可重复小单元, 电场计算时, 边界条件的设置十分重要. 合适的边界条件设定可以确保对电场计算结果在 x 和 y 方向重复时的准确性. 在 Gmsh 对 GEM-MM 建模中, 设置各个电极的表面为不同电压的边界条件. 长方体单元的相对侧面设置为对称边界条件.

将电场计算的结果导入到 Garfield++ 中, 由其所提供的 Magboltz 接口定义探测器的工作气体. 由于工作气体参数, 如漂移速度、扩散系数、吸附系数以及倍增系数等对电子输运过程有重要的影响, 利用 Magboltz 程序计算了气体的相关性质. 由于这些气体参数依赖于电场大小, 最后由 AvalancheMicroscopic 类提供的方法计算电子在气体中的输运过程时根据电子所处位置的电场大小考虑了气体参数的影响. Garfield++ 提供了 ROOT 接口, 计算的结果保存为 ROOT 文件, 进行相应的数据处理和分析.

模拟研究主要包括两方面的内容. 首先是对电子在 GEM-MM 探测器中电荷输运过程的模拟, 目的在于确定电子在 GEM-MM 中各个电极上的收集情况及其与 GEM-MM 探测器电场配置的关系. 模拟中, 电子随机放置在图 2(a) 所示的漂移区内, 距离 GEM 膜上表面为 0.5 mm. 计算电子在不同的探测器电场配置下的漂移以及放大过程, 统计 5000 次电子事例及其对应的所有倍增电子在探测器中的位置信息并保存为 ROOT 文件. 对 GEM 增益的计算是模拟研究的第二个重要内容. 在图 2(b) 所示模型的漂移区内距离 GEM 膜上表面为 0.5 mm 的平面上随机放置原初电子, 在不同的 GEM 电压下模拟电子在经过 GEM 膜后的倍增数目. 统计 5000 个原初电子分别对应的电子倍增数目分布,

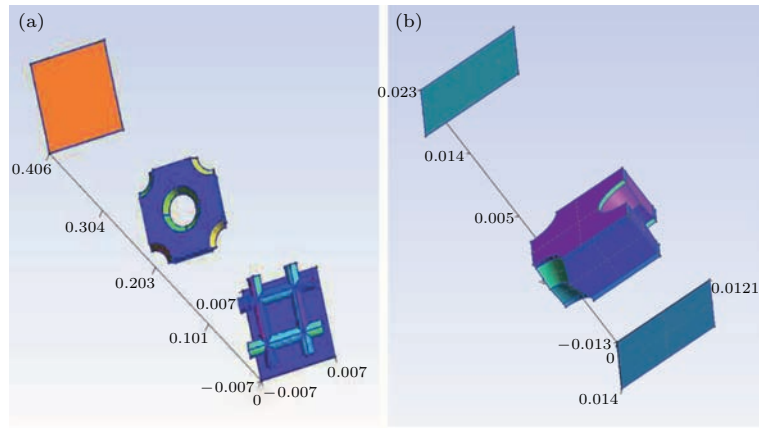


图2 (网刊彩色)使用 Gmsh 建立的探测器几何构型 (a) GEM-MM 结构, 自上至下为漂移极、GEM 膜、金属丝网和读出阳极; (b) GEM 探测器结构, 包括漂移极、GEM 膜和读出阳极. 图中单位为 cm
 Fig. 2. (color online) The structure of detector module by Gmsh software tool (a) GEM-MM detector: drift cathode, GEM, stainless steel mesh and readout anode from top to bottom (b) GEM detector: drift anode, GEM and readout anode (in cm).

分析得到 GEM 的增益. 模拟中工作气体设置为 Ar/iC₄H₁₀(95/5) 混合气体, 温度为 20 °C, 气压为 1 atm. 计算了 GEM 在三种不同类型和配比气体下的增益.

2.2 模拟结果

2.2.1 电场计算

探测器中电子的运动与其所处的电场环境密切相关, 因此对探测器的电场计算是后续模拟研究的基础, 电场计算结果如图 3 所示. 图 3(a) 为探测器在 x - z 平面的电场大小分布, 为了更好地展示出 GEM 膜以及 MM 金属微网附近的电场结构, 对传输区的距离做了调整. 从图中可以看出, 仅在 GEM 以及 MM 金属微网附近存在不均匀的电场. 且这种不均匀的电场向 GEM 膜以及金属网的微孔聚拢, 这一特性有利于提高电子的透过率. 图 3(b) 为图 3(a) 所示平面内沿 $x = 0$ 的直线上电场大小的分布, 横轴表示直线上距离最下方读出阳极的相对距离. 从图中可见 MM 雪崩区、GEM 微孔的高强电场以及感应区和漂移区的电场. GEM-MM 结构中电场配置分别是漂移区场强 (E_d), GEM 工作电压 (V_{GEM})、传输区场强 (E_t) 以及 MM 工作电压 (V_{mesh}). 图 3 所示的电场计算结果对应的电场配置为: $E_d = 1$ kV/cm, $V_{GEM} = 300$ V, $E_t = 1.5$ kV/cm, $V_{mesh} = 440$ V.

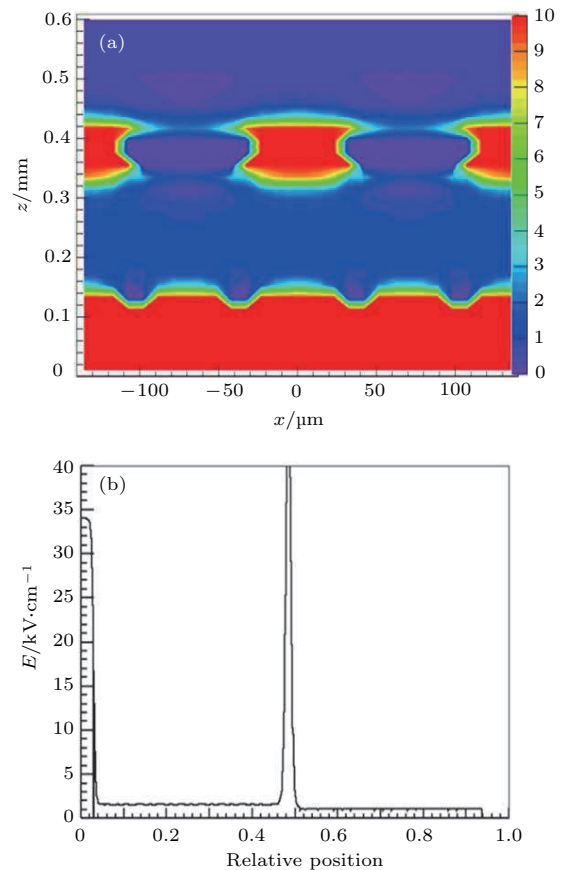


图3 (网刊彩色)由 ANSYS 计算的 GEM-MM 探测器电场强度 (a) 在 x - z 平面的分布; (b) 沿穿过 GEM 孔中心的直线路径上的分布
 Fig. 3. (color online) The electric field of GEM-MM detector calculated by ANSYS: (a) Distribution in the x - z plane; (b) distribution along the center of the GEM detector's hole.

2.2.2 电子透过率

模拟中电子由漂移区向GEM膜运动, 经过GEM的雪崩放大后继续向MM传输, 经过第二次倍增后被读出电极收集. 该过程中电子有可能终止在其他电极或者气体介质内, 而这一过程与探测器的电场配置相关. 因此需要优化确定探测器电场配置以保证电子在读出电极上的收集效率. 模拟中根据电子终止位置, 确定出其最后是被探测器的哪一个电极所收集. 探测器中电子在各个电极的收集情况与GEM-MM各部分电场(或工作电压)关系的模拟结果如图4所示, 图中纵轴表示探测器中在各个电极上收集的电子数与总电子数

(包括初始电子事例以及倍增产生的电子)的比值. 图4(a)—图4(d)所示为分别改变四个电场变量中的 E_d , V_{GEM} , E_t 以及 V_{mesh} , 保持其他三个变量不变时电子在各个电极的收集情况随电场及电压的变化. 如改变MM的工作电压 V_{mesh} 时, GEM膜上下表面以及漂移极的电压均随之改变, 但保持传输区、漂移区两端以及GEM膜两侧电极压差不变, 从而保持 V_{GEM} , E_t 以及 V_{mesh} 不变. 四部分场强及电压分别设置为 $E_d = 100 \text{ V/cm}$, $V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $E_t = 100 \text{ V/cm}$ 及 $V_{mesh} = 420 \text{ V}$. 图中未给出电极上电子收集比例为零或者十分接近于零.

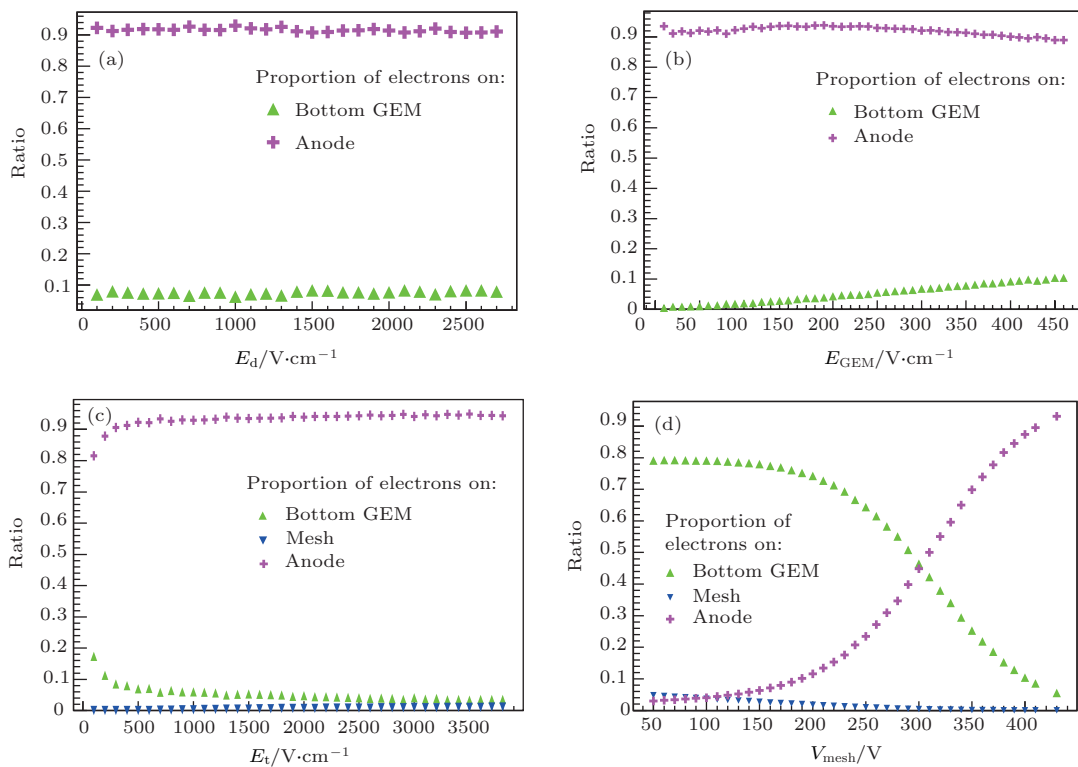


图4 (网刊彩色) 模拟计算电子在GEM-MM探测器各电极上收集比例 (a) 与 E_d 的关系 ($V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (b) 与 V_{GEM} 的关系 ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (c) 与 E_t 的关系 ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (d) 与 V_{mesh} 的关系 ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$)

Fig. 4. (color online) The ratio of the simulated electrons ended on the different electrodes by all electrons: (a) The ratio with E_d ($V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (b) the ratio with V_{GEM} ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (c) the ratio with E_t ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $V_{mesh} = 420 \text{ V}$); (d) the ratio with V_{mesh} ($E_d = 100 \text{ V/cm}$, $V_{GEM} = 340 \text{ V}$, $E_t = 500 \text{ V/cm}$).

漂移区电场对电子输运影响较小, 改变不同漂移场强, 电子在各电极收集的比例基本保持不变, 如图4(a)所示. GEM与MM的工作电压影响则非常明显, 如图4(b)及图4(d)所示. 当GEM工作电压升高保持传输区场强不变时, GEM膜内倍增电

子的出孔率会相应降低, 导致更多的电子被收集于GEM膜的下表面电极. 在GEM-MM探测器中, 为保持GEM膜对电子的出孔率不变, 需要保持GEM的工作电压与传输区两侧的电压差的比例不变. 即在改变GEM工作电压时, 传输区电场也需要随之

改变. MM工作电压越高,金属网对电子的透过率越高.由此可知,要提高电子的收集效率,MM需要工作在较高的工作电压下,而GEM工作电压不宜过高.图4(c)描述了传输区电场对电子收集比例的影响.在GEM工作电压为340 V时,传输区场强高于500 V/cm后,GEM的电子出孔率基本达到最大并保持恒定.

2.2.3 增益

对GEM增益的模拟是研究的一个主要内容.由于Penning效应对增益有着一定的贡献,在Garfield++的模拟中以系数 r 描述了Penning效应带来的气体电离. r 表示具有激发能高于气体电离能的激发态所引发的气体电离概率.在设定的Ar/iC₄H₁₀(95/5)混合气体中, r 参考值选取为0.40^[21].模拟中漂移区和感应区的场强分别是 $E_d = 250$ V/cm和 $E_i = 1$ kV/cm.GEM电子倍增对应的增益可以用Polya分布描述^[22]

$$P(G) = C_0 \frac{(1 + \theta)^{1+\theta}}{\Gamma(1 + \theta)} \left(\frac{G}{G_0}\right)^\theta \times \exp\left[-(1 + \theta)\frac{G}{G_0}\right], \quad (1)$$

式中 C_0 为常数; G_0 为单电子倍增分布的平均增益; θ 是决定Polya分布方差的参数,其大小与能量超过电离阈值的电子比例有关.图5所示为GEM电压为300 V时,5000个电子经过GEM膜倍增后电子数量分布的模拟结果.红色线为按照(1)式拟合

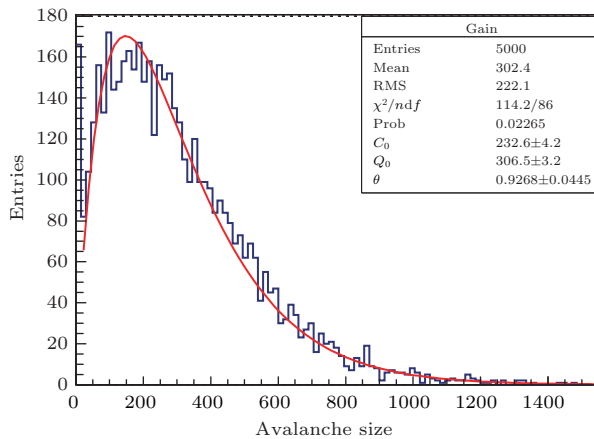


图5 模拟计算 Ar/iC₄H₁₀(95/5) 混合气体中 GEM 单电子倍增数分布, $V_{GEM} = 300$ V, $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm, $r = 0.40$

Fig. 5. Simulated single electron avalanche size distribution of GEM in Ar/iC₄H₁₀(95/5) with $V_{GEM} = 300$ V, $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm, Penning transfer rate $r = 0.40$.

的结果,可以看出Polya分布可以很好地描述GEM的增益.

但是当GEM电压较低时,模拟中发现增益并不能用Polya很好地描述.图6是GEM电压为150 V时,5000个电子经过GEM膜倍增后总的电子数量分布模拟结果.此时倍增电子数分布没有Polya分布中明显的最大值,这时用指数分布描述更为合适^[23],

$$P_G = \frac{C_1}{G_0} \cdot \exp\left(-\frac{G}{G_0}\right), \quad (2)$$

式中 C_1 为常数.图6所示的拟合结果中Slope = $-1/G_0$,其中 G_0 为单电子倍增后的平均增益.

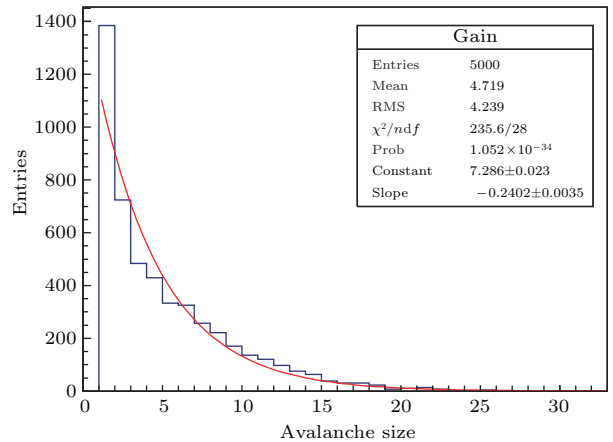


图6 模拟计算 Ar/iC₄H₁₀(95/5) 混合气体中 GEM 单电子倍增数分布, $V_{GEM} = 150$ V, $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm, $r = 0.40$

Fig. 6. Simulated single electron avalanche size distribution of GEM in the operation gas of Ar/iC₄H₁₀(95/5) at $V_{GEM} = 150$ V, $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm, $r = 0.40$.

模拟中对GEM的总增益和有效增益做了区分.总增益(G)即每个电子发生雪崩后的总电子数,其中包括以各种方式(气体对电子的吸附以及GEM膜结构对电子的吸收等)损失从而未能被读出电极收集的电子.有效增益(G_{eff})则指原初电子经GEM膜倍增后到达读出电极的电子数,不包括在到达读出电极之前损失掉的电子.图5及图6所示为总增益,本文中实验部分增益均为有效增益,模拟中提到的增益除特别指出外,也指有效增益.模拟的GEM单电子增益分布在不同的GEM电压下采取了不同的拟合方式(指数拟合以及Polya拟合).从单电子倍增数分布中直接获取平均值也可以得到增益.Ar/iC₄H₁₀(95/5)气体中GEM增益的模拟结果列于表1.从结果来看,总增益与有效增益区别较大,这主要是由GEM

膜(包括两侧金属电极以及中间 Kapton 膜)对电子的吸收造成的. 模拟给出了 Ar/iC₄H₁₀(95/5), Ar/CO₂(90/10) ($r = 0.452$) 以及 Ar/CO₂(70/30) ($r = 0.57$) [24] 混合气体中的增益特性, 结果如图 7 所示. 从图中可以看出, 在 GEM 相同工作电压下, Ar/iC₄H₁₀(95/5) 较其他两种气体具有最高增益, 且与 GEM 工作电压之间表现出很好的指数相关性. GEM 增益的实验测量中, 选取了 Ar/iC₄H₁₀(95/5) 工作气体.

表 1 Ar/iC₄H₁₀(95/5)($r = 0.40$) 混合气体中 GEM 增益模拟结果

Table 1. Total gain and effective gain of GEM simulation in the Ar/iC₄H₁₀(95/5) with $r = 0.40$.

GEM 电压/V	总增益		有效增益	
	拟合结果	平均值	拟合结果	平均值
100	1.08 (Expo)	1.67	0.52 (Expo)	0.18
150	4.16 (Expo)	4.72	1.18 (Expo)	0.76
190	16.88	13.98	2.95 (Expo)	2.47
200	22.6	18.75	4.77	3.29
210	29.63	25.34	6.06	4.47
220	38.17	33.26	7.35	5.77
230	49.95	43.97	9.00	7.42
240	67.38	61.01	12.18	10.13
250	90.69	83.37	15.65	13.60
300	306.50	370.21	65.47	53.88

注: 采用指数拟合的得到的结果在表中做了标注 (Expo), 未标注的拟合结果为 Polya 拟合得到的 G_0 .

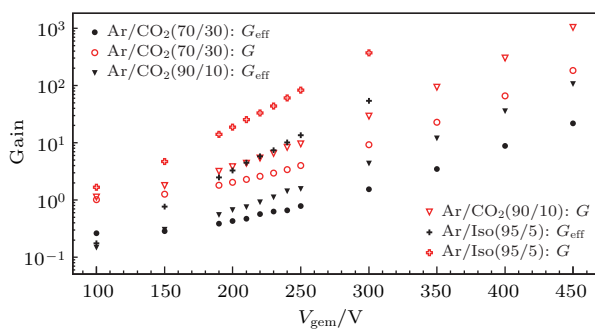


图 7 (网刊彩色) 不同气体中 GEM 增益与 GEM 工作电压关系的模拟结果, $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm

Fig. 7. (color online) Simulated gain of GEM in the different gas mixtures at $E_d = 250$ V/cm, $E_i = 1$ kV/cm.

3 测量原理与实验装置

3.1 GEM-MM 结构和增益测量原理

GEM-MM 的结构如图 8 所示, 自上而下为漂移极、GEM 膜、金属丝网和读出阳极. GEM 膜

为欧洲核子中心提供的标准结构 GEM. MM 为与 Saclay 实验室合作的基于 Bulk 工艺的探测器, 其雪崩区间距为 128 μm . 金属丝网丝径 22 μm , 丝间距 40 μm . 漂移区和传输区间距分别为 4 和 1.4 mm.

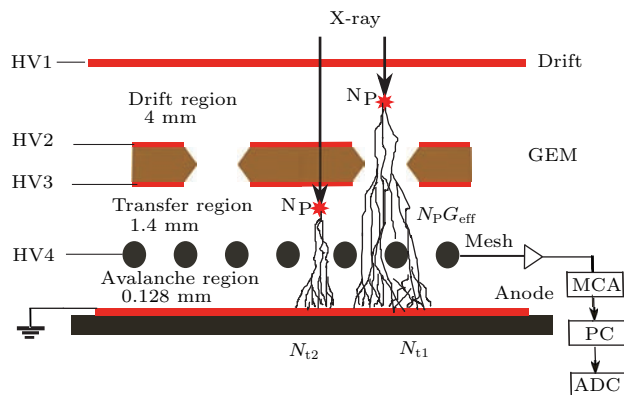


图 8 GEM-MM 探测器结构示意图

Fig. 8. The schematic diagram of GEM-MM detector.

实验采用的工作气体为氩基混合气体 (Ar/iC₄H₁₀(95/5)). 光电效应是能量 E_X 为 5.9 keV 的 ⁵⁵Fe X 射线与氩原子相互作用的主要物理过程. 发生光电效应时, 光子与氩原子内层电子或束缚电子发生相互作用, 其能量被完全吸收, 用于电离或者激发氩原子. 电离过程中, 获得能量的电子发射出来成为自由电子 (光电子). 发射特征 X 射线能量为

$$E_{X'} = E_K - E_L, \quad (3)$$

式中 E_K 和 E_L 分别为 K 和 L 壳层电子的结合能. 另外一种方式为发射俄歇电子, 这两种过程同时存在. 光电效应过程中产生的所有电子 (包括光电子和俄歇电子) 由于能量较低, 其能量全部沉积在探测器的气体介质中. 因此在实验测量的能谱中存在一个与俄歇电子发射相对应的 X 光子能量全部沉积形成的全能峰, 以及特征 X 射线过程相对应的逃逸峰.

X 射线由探测器上方的入射窗进入工作气体内. 5.9 keV X 射线在厚度为 4 mm 的氩气中的转换效率约 13% [25], 部分光子在漂移区沉积能量, 还有部分光子在传输区与气体发生相互作用. 因此在漂移区和传输区都会产生光电子. 漂移区产生的光电子在电场的作用下经过 GEM 膜和 MM 两级的倍增放大, 最终在读出极收集为 N_{t1} . 而在传输区产生的光电子只经过 MM 一级的放大, 最后被收

集在读出极上为 N_{t2} . 因此, 实验测量得到的 ^{55}Fe 能谱包含有两组全能峰和逃逸峰. 设 GEM 膜和 MM 的增益分别为 G_{eff} 和 G_{mm} , GEM-MM 的增益为 $G_{\text{gem-mm}}$, 则有

$$N_{t1} = N_p \cdot G_{\text{eff}} \cdot G_{\text{mm}} = N_p \cdot G_{\text{gem-mm}}, \quad (4)$$

$$N_{t2} = N_p \cdot G_{\text{mm}}, \quad (5)$$

由此, GEM 的增益可表示为

$$G_{\text{eff}} = \frac{N_{t1}}{N_{t2}}. \quad (6)$$

而读出极收集的电荷量正比于多道的道数, 因此

$$G_{\text{eff}} = \frac{\text{CH}_1}{\text{CH}_2}, \quad (7)$$

式中 CH_1 和 CH_2 分别为漂移区和传输区光子能量沉积对应的多道的道数, GEM 膜的增益测量就转换为多道道数比值的测量, 无需电子学的标定以及对原初电离电子数的估算.

3.2 实验装置

增益测量实验装置如图 9 所示. 整体的 GEM-MM 探测器有效面积为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 读出电极为面积为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的单个 Pad. MM 雪崩区的倍增电子在金属网和读出阳极感应出大小相等极性相反的信号, 因而从两个电极都可以进行测量. 但是实验测量中发现, 若从阳极读出, 由于金属丝网电极高压端需要加保护电阻, 而保护电阻会使得阳极读出的信号远小于不接保护电阻时的信号. 此外由于所使用的电荷灵敏前置放大器输入端存在隔直电容, 因此阳极读出时还需要加接地电阻, 以利于电荷泄放, 避免探测器工作不稳定. 鉴于此, 在只有单个读出单元的 GEM-MM 探测器测试中, 采取了 Pad 接地, 从金属丝网读出信号的方式. 其余电极采用了 CAEN N471 型高压插件提供



图 9 复合结构探测器实物图

Fig. 9. Photos of the GEM-MM detector in lab.

高压, 信号读出前端采用 ORTEC 142IH 电荷灵敏型前置放大器, 主放为 ORTEC 572 A, 成形时间设置为 $1 \mu\text{s}$. 数据最后由 ORTEC ASPEC927 多道分析器收集. 射线源活度为 5 mCi 的 ^{55}Fe X 放射源. 采用流气式工作模式, 气流量为 30 mL/min .

4 测量结果分析

4.1 能谱测量

读出 Pad 上的感应电荷, 经过前置放大器和主放大器放大成形后, 由多道分析器采集. 图 10 为 GEM-MM 探测器的能谱测量结果. GEM 和 MM 的工作电压分别为 240 和 370 V, 随漂移区和传输区场强分别为 300 和 625 V/cm . 从图中可以明显地看到四个峰位, 前两个分别为传输区光子事例的逃逸峰和全能峰, 后两个则分别对应漂移区光子事例的逃逸峰和全能峰. 图中同时给出了高斯拟合的结果, 拟合后可确定出全能峰对应的多道的道值及其误差. 利用传统的增益测量方法, 可以确定出 MM 和 GEM-MM 探测器的增益. GEM 的增益根据 (7) 式由能谱直接测量得到. 即分别拟合出两个全能峰的道值, 后面道数与前面道数的比值就是 GEM 的增益.

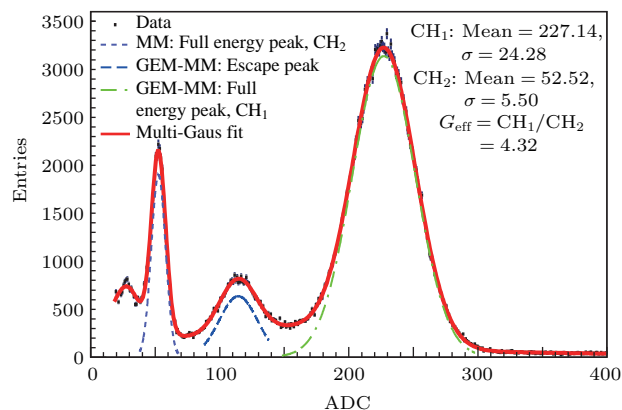


图 10 (网刊彩色) GEM-MM ^{55}Fe 放射源 X 射线能谱测量图 $V_{\text{GEM}} = 220 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_t = 625 \text{ V/cm}$, $E_d = 300 \text{ V/cm}$

Fig. 10. (color online) Energy spectrum of GEM-MM detector with ^{55}Fe source @ $V_{\text{GEM}} = 220 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_t = 625 \text{ V/cm}$, $E_d = 300 \text{ V/cm}$.

采用相对方法测量 GEM 增益误差来源于对两个全能峰峰位的测量. 如图 10 所示, 对 GEM-MM 对应的全能峰和 MM 对应的全能峰分别做高斯拟合后, 平均值为所得峰位 ($\overline{A_{\text{CH}_1}}$ 和 $\overline{A_{\text{CH}_2}}$). 取高斯拟合的标准差为峰位测量的误差 (分别为 σ_{CH_1} . 在

图 10 所示的能谱测量中, 利用拟合结果可得 GEM-MM 相对方法测量 GEM 增益的相对误差为

$$\frac{\sigma_{G_{\text{eff}}}}{G_{\text{eff}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{CH}_1}}{A_{\text{CH}_1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{CH}_2}}{A_{\text{CH}_2}}\right)^2} = 14.96\%. \quad (8)$$

另一方面, 传统增益测量方法中, 由原处电离电子计算带来的误差主要来源于平均电离能的误差 σ_w 、刻度电子学 σ_e 的误差以及能谱测量的误差 σ_{ch} . 总的误差可表示为

$$\sigma_{G_{\text{eff}}} = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_e^2 + \sigma_{\text{ch}}^2}. \quad (9)$$

由文献给出的平均电离能误差, 在混合气体中, 平均电离能的计算误差可由单一气体的计算误差得到, 在 Ar- $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ 混合气体中为 14%; σ_e 小于 1%, σ_{ch} 即为 (8) 式中 σ_{CH_1} . 由此可见, 采用相对方法测量更加精确.

4.2 增益测量

GEM-MM 探测器的增益与 GEM 和 MM 的工作电压直接相关. 此外漂移区和传输区的场强同样

会对增益有影响. 实验中首先测量了增益随漂移区和传输区场强的变化关系, 结果如图 11 所示. 图中增益为 GEM-MM 的增益, 通过传统方法测量得到.

优化测量中, MM 和 GEM 的工作电压分别保持在 $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$ 和 $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$. 首先传输区的场强固定在 $E_t = 625 \text{ V/cm}$, 测量了增益随 E_d 的变化, 如图 11 (a) 所示. 从图中可以看出, 随着漂移区场强的增加, 增益先增大后减小. 这是因为在漂移区场强较低时, 电离电子不能完全进入到 GEM 中得到放大, 有相当一部分的电子在漂移区被吸收. 随着电场强度的增加, 电离电子到达 GEM 膜的比例达到最大值. 但是当漂移区电场强度进一步增大时, 电子被收集到 GEM 膜上表面电极的比例增加, 从而导致增益下降. 优化选取 $E_d = 300 \text{ V/cm}$. 随后 E_d 保持 300 V/cm 不变, 测量增益随传输区场强变化关系, 如图 11 (b) 所示. 随着 E_t 的增加, 增益呈现出先增大后减小的变化. 原因是 MM 金属丝网对电子的透过率随着传输区

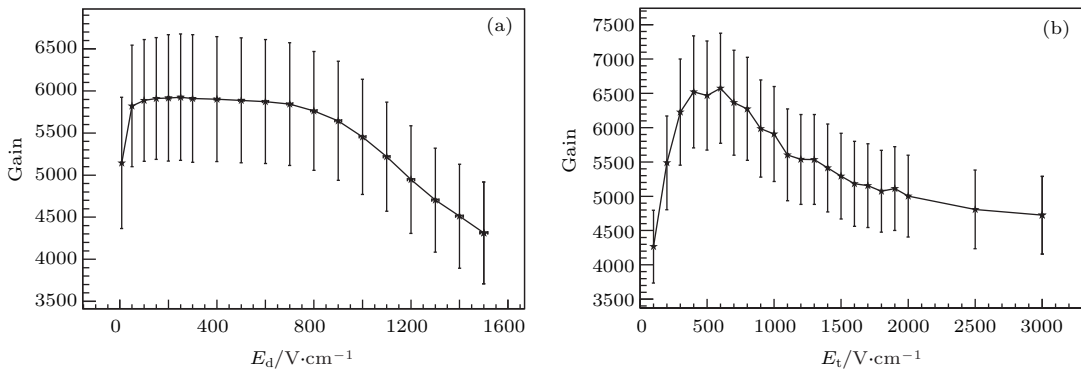


图 11 GEM-MM 测量增益 (a) 随漂移区场强变化, $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_t = 625 \text{ V/cm}$; (b) 随传输区场强变化, $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_d = 300 \text{ V/cm}$

Fig. 11. Measurement of GEM-MM detector's gain: (a) E_d 10–1500 V/cm @ $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_t = 625 \text{ V/cm}$; (b) E_t 100–3000 V/cm @ $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$, $E_d = 300 \text{ V/cm}$.

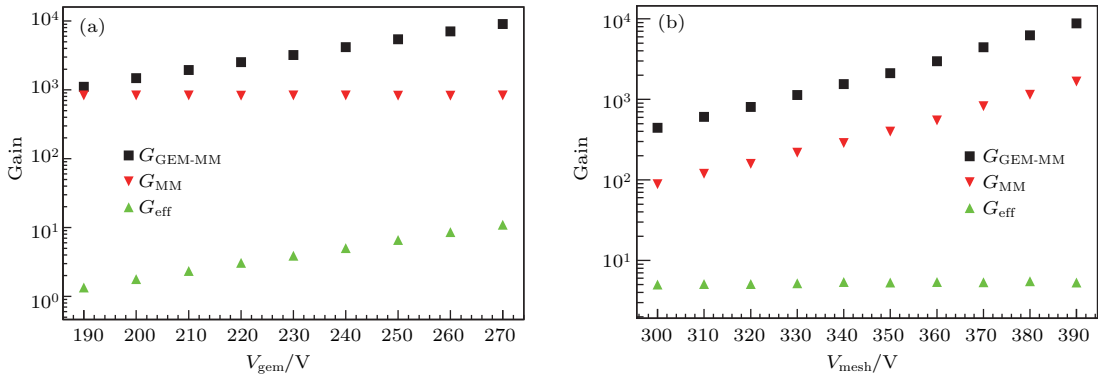


图 12 探测器测量增益 (a) 随 GEM 工作电压的变化, $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$; (b) 随 MM 工作电压的变化, $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$; E_d 及 E_t 随 GEM 或 MM 工作电压按比例变化

Fig. 12. Measurement of the detector's gain: (a) V_{GEM} 190–270 V @ $V_{\text{MM}} = 370 \text{ V}$; (b) V_{MM} 300–390 V @ $V_{\text{GEM}} = 240 \text{ V}$ and E_d/E_t according to the optimized voltage ratio.

场强的增加是先升高后降低的. 优化选取最大增益处 $E_t = 625 \text{ V/cm}$, 据此确定 GEM 电压与漂移区两侧电压差的比值以及传输区两侧压差分别与 V_{GEM} 及 V_{MM} 的比值. 优化工作电压后, 在后续增益测量中, 改变 GEM 或 MM 工作电压时, 保持 E_t 和 E_d 同比例变化, 以保证 GEM-MM 最大的电子透过率.

根据能谱测量结果, 进行了 GEM-MM 增益与 GEM 和 MM 工作电压关系的测量, 结果图 12 所示. 其中 GEM 增益根据能谱中全能峰道值直接得到,

GEM-MM 探测器的增益和 MM 的增益采用传统方法经过电子学的标定测量得到.

5 测量结果与模拟结果对比

利用 Garfield++ 计算的 $\text{Ar/iC}_4\text{H}_{10}(95/5)$ 气体中 GEM 增益与利用 GEM-MM 复合结构采用相对方法测量的 GEM 增益进行了对比, 结果如图 13 所示. 图中 $G_{\text{eff}}(\text{fitted mean})$ 为采用拟合方法获取的增益, $G_{\text{eff}}(\text{mean})$ 表示增益分布直方图的平均值.

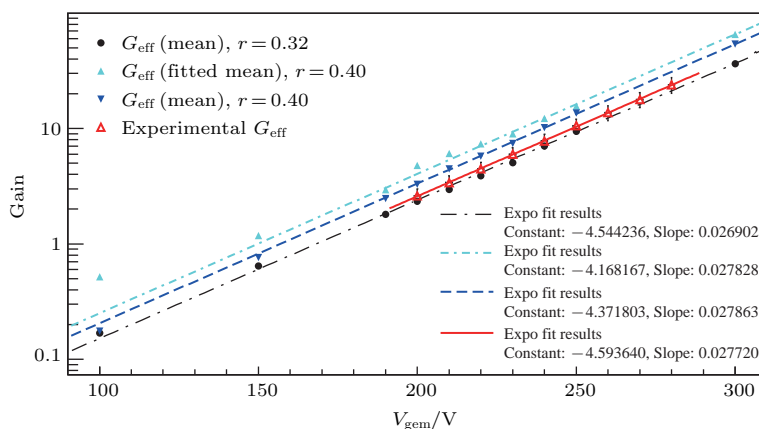


图 13 (网刊彩色) GEM 增益随工作电压变化的模拟与实验测量结果比较

Fig. 13. (color online) Comparison of GEM gain simulation and measurement results.

模拟的有效增益结果与 GEM 电压的关系如图 13 所示, 可以看出增益越低, 模拟中采用取平均值和拟合得到的增益二者结果差别越大. 尤其是在增益较低时 (小于 5), 增益与 GEM 电压的关系偏离指数关系. 这是因为在 GEM 工作电压较低时, 有很大一部分的电子经过 GEM 膜后没有发生倍增, 且会大概率地被 GEM 膜所收集. 从而导致了有效增益小于 1, 拟合方法得到的结果会有较大偏差. 因此在增益的模拟中, 在 GEM 增益较低时取单电子增益分布的平均值作为平均增益更为合适. 图中红色三角符号标识为 GEM 增益实验测量结果, 蓝色三角符号标识为 $r = 0.40$ 时增益的模拟结果, 可以看到模拟增益较测量结果偏高. 这是因为文献 [21] 中只给出了 $\text{Ar/iC}_4\text{H}_{10}(90/10)$ 气体中 Penning 系数的取值 ($r = 0.40$), 而实验中工作气体为 $\text{Ar/iC}_4\text{H}_{10}(95/5)$. 于是进行了不同 r 取值的增益计算, 图中黑色标识的实心圆点为 $r = 0.32$ 时的增益模拟结果, 可以看到模拟的增益结果与

实验测量结果基本一致. 通过对 Penning 系数取值的进一步微调, 当 $r = 0.32 \pm 0.01$ 时模拟的增益值在实验测量 1σ 的误差范围之内. 由此得到 $\text{Ar/iC}_4\text{H}_{10}(95/5)$ 混合气体中 (一个大气压), Penning 系数取值为 $r = 0.32 \pm 0.01$.

6 结 论

本文提出了一种由 GEM 与 MM 级联构成的复合结构探测器 GEM-MM. GEM 与 MM 级联的方案较之前的与 PMGC 以及 MSGC 级联方案有明显的优势. 在该结构探测器的能谱测量中可以清楚地区分 GEM 和 MM 对整体增益的贡献. 在 ^{55}Fe X 射线入射时, 测量的能谱中出现两个全能峰及逃逸峰, 两个全能峰的比值即为 GEM 的有效增益. 适当增加 MM 的增益后, 以这种相对方法可以实现 GEM 低增益的测量. 此外这种方法测量 GEM 的增益避免了对电子学繁杂的标定过程, 且无需进行原初电离电子数的估算. 模拟研究中确定了其合

适的工作电压以及工作气体. 实验中研制了GEM-MM探测器,并在Ar/iC₄H₁₀(95/5)混合气体中进行了GEM增益的相对方法测量. 得到了GEM在3—24范围内的有效增益. 实际上,单层GEM增益为20时,三层GEM级联探测器的总增益为6000. 这正是三层GEM级联探测器的通常工作增益,本文中测量的单层GEM增益范围包含了多层GEM级联探测器的通常工作增益范围. 高的探测器增益是为了在电子学噪声水平较高时提高信噪比,而对于低噪声水平的电子学,较低的探测器增益就能满足信噪比的要求. 因此低GEM增益的测量对于低噪声水平的电子学设计具有重要的参考意义. 在GEM和MM的工作电压分别为220和370 V时,这种方法测量GEM增益的相对误差为14.96%. 这一误差小于传统增益测量方法的测量误差,因而更加精确. 结合实验测量结果与模拟研究,通过调整Penning系数获得与实验测量GEM增益相符的结果,确定了Ar/iC₄H₁₀(95/5)气体中的Penning系数为 0.32 ± 0.01 . 基于本文的研究工作,下一步会开展对Ar-CF₄-iC₄H₁₀ (95 : 3 : 2)(所谓的T2K气体)以及其他工作气体Penning系数以及多层级联GEM增益精细测量的研究.

感谢清华大学工物系高原宁教授对复合结构气体探测器研制中的支持以及对于本文写作的中肯建议;感谢法国原子能研究院CEA-Saclay气体探测器组负责人Roy教授对微网结构气体探测器研制和研究工作的帮助及支持;感谢中国科学院高能物理研究所苑长征研究员和唐光毅博士对本文写作的建议.

参考文献

- [1] Sauli F 1997 *Nucl. Instrum. Methods A* **386** 531
- [2] Sauli F 2016 *Nucl. Instrum. Methods A* **805** 2
- [3] Ketzner B, Weitzel Q, Paul S, Sauli F, Ropelewski L 2004 *Nucl. Instrum. Methods A* **535** 314
- [4] Bressan A, de Oliveira R, Gandi A, Labbé J C 1999 *Nucl. Instrum. Methods A* **425** 254
- [5] Ketzner B 2013 *Nucl. Instrum. Methods A* **732** 237
- [6] Benloch J M, Dokoutchaeva V, Malakhov N, Menzione A, Munar A 1998 *Nucl. Instrum. Methods A* **419** 410
- [7] Tsionou D 2017 *Nucl. Instrum. Methods A* **845** 309
- [8] Abbaneo D, Abbas M, Abbrescia M, et al. 2017 *Nucl. Instrum. Methods A* **845** 298
- [9] Lippmann C 2016 *Nucl. Instrum. Methods A* **824** 543
- [10] Giomataris Y, Rebourgeard Ph, Robert J, Charpak G 1996 *Nucl. Instrum. Methods A* **376** 29
- [11] Blum W, Rolandi L 1993 *Particle Detection with Drift Chambers* (Berlin: Springer) p125
- [12] Snäll J 2016 *M. S. Thesis* (Lund: Lund University)
- [13] Binks W 1954 *Acta Radiologica* **41** 85
- [14] Benloch J, Bressan A, Buttner C, Capeans M, Gruwe M, Hoch M, Labbe J C, Placci A, Ropelewski L, Sauli F, Sharma A, Veenhof R 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 234
- [15] Bellazzini R, Brez A, Gariano G, Latronico L, Lumb N, Spandre G, Massai M M, Raffo R, Spezziga M A 1998 *Nucl. Instrum. Methods A* **419** 429
- [16] Charpak G, Derré J, Giomataris Y, Rebourgeard P 2002 *Nucl. Instrum. Methods A* **478** 26
- [17] Kane S, May J, Miyamoto J, Shipsey I 2003 *Nucl. Instrum. Methods A* **515** 261
- [18] Schindler H, Veenhof R Garfield++, <https://garfieldppwebcernch/garfieldpp/> [2016-10-04]
- [19] Geuzaine C, Remacle J F 2009 *Int. J. Numer. Methods Engineer.* **79** 1309
- [20] CSC-IT Center for Science LTD, Elmer, <https://www.scfi/web/elmer/elmer> [2016-10-04]
- [21] Sahin Ö, Tapan I, Özmütlu E N, Veenhof R 2010 *JINST* **5** 05002
- [22] Zerguerras T, Genolini B, Lepeltier V, Peyré J, Pouthas J, Rosier P 2009 *Nucl. Instrum. Methods A* **608** 397
- [23] Mir J A, Maia J M, Conceição A S, et al. 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 2334
- [24] Sahin Ö, Kowalski T Z, Veenhof R 2014 *Nucl. Instrum. Methods A* **768** 104
- [25] Xie Y G, Chen C, Wang M, Lü J G, Meng X C, Wang F, Gu S D, Guo Y N 2003 *Nuclear Detector and Data Acquisition* (Beijing: Science Press) p628 (in Chinese) [谢一冈, 陈昌, 王曼, 吕军光, 孟祥承, 王峰, 顾树棣, 过雅南 2003 粒子探测器与数据获取 (北京: 科学出版社) 第628页]

Measurement and simulation of the hybrid structure gaseous detector gain*

Zhang Yu-Lian¹⁾²⁾³⁾ Qi Hui-Rong²⁾³⁾† Hu Bi-Tao¹⁾²⁾‡ Wen Zhi-Wen¹⁾²⁾³⁾
 Wang Hai-Yun²⁾³⁾⁴⁾ Ouyang Qun²⁾³⁾ Chen Yuan-Bo²⁾³⁾ Zhang Jian²⁾³⁾

1) (School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, 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) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 16 March 2017; revised manuscript received 24 April 2017)

Abstract

As one of the most popular micro pattern gaseous detectors, gas electron multiplier (GEM) has been extensively studied and applied in recent years. The studies of the detector gain measurement and simulation are important, especially on a low gain scale. Traditionally, the gain measurement is realized by measuring the current or the pulse height spectrum. The former needs complicated electronic chain calibration and the latter needs necessarily to calculate the primary electron number. In this paper, an alternative method to determine the effective gain of GEM is introduced. The GEM gain can be precisely achieved through a gaseous detector of hybrid structure which combines GEM with micro-mesh gaseous structure (MM). The hybrid structure is called GEM-MM for short. The GEM-MM detector consists of drift cathode, standard GEM foil, stainless steel micro mesh, and readout anode. In this detector, the space between the cathode and the GEM foil is called drift gap and the other space between the GEM foil and the mesh is named transfer gap. When the X-rays irradiate into the gas volume of GEM-MM, the primary ionization occurs in both regions. Photoelectrons in the drift gap transfer from the drift region to amplification sensitive areas of the GEM and the MM detector while those in the transfer region are only amplified by the MM detector. In the energy spectrum of ^{55}Fe , there is a clear energy profile including two sets of peaks. The gain of GEM can be easily obtained from the energy spectrum. Meanwhile, detailed simulations are carried out with Garfield++ software package. Simulation of the electron transport parameters has been optimized. and the gains of GEM detector are also calculated for three different gas mixtures. Experimental results of the gains ranging from 3 to 24 are obtained. The gains of GEM under different working voltages are studied precisely from the spectrum measurements. The Penning transfer rate could reach 0.32 ± 0.01 when the simulated value matches the measurement within 1σ error.

Keywords: gas electron multiplier, micromegas, gain

PACS: 29.40.Cs

DOI: 10.7498/aps.66.142901

* Project supported by the National Key Programme for S&T Research and Development, China (Grant No. 2016YFA0400400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11675197), and the Innovation Fund of Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: qih@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hbt@lzu.edu.cn