

文章编号: 1007-4627(2019)01-0085-06

新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

魏鑫, 王晓冬[†], 程凯, 刁伟卓, 陈国祥, 贺三军, 李婷婷, 赵越, 柳正

(南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 新型多层厚型气体电子倍增器(Multi-layers THick Gas Electron Multiplier, M-THGEM)和传统THGEM(厚型气体电子倍增器)相比, 具有连续的雪崩区, 能够在低气压和低电压下都有较高增益, 结构更紧凑, 易于大面积制作等优势。对M-THGEM探测器的工作原理及性能进行了模拟研究, 首先通过有限元(ANSYS)软件对二层与三层结构的M-THGEM进行了建模, 对电场和电势分布分别进行了模拟计算; 再利用Garfield++程序包对M-THGEM探测器在不同低气压和不同工作电压下的增益、感生信号、正离子反馈率等性能进行了研究。模拟结果表明, 三层结构M-THGEM在低气压(200 Torr)、纯He气体条件下, 能够获得较稳定的增益(10^5), 输出信号的宽度在12 ns左右; 同时, 为降低正离子反馈率, 本工作提出并研究了一种非对称的电压施加方式, 结果表明, 这种施加方式能有效降低正离子的反馈率。

关键词: Garfield++; M-THGEM; 蒙特卡罗模拟; 有限元法; 气体电子倍增器

中图分类号: TL811 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.01.085

1 引言

近年来, 微结构气体探测器在大型科学装置需求的驱动下已经得到了蓬勃发展, 当前主流的微结构气体探测器有两种结构: 微网型MicroMegas和微孔型电子气体电子倍增器(Gas Electron Multiplier, GEM), 其中GEM由欧洲核子中心的Sauli^[1]于1997年提出并发明。微结构气体探测器设计初衷主要是为满足高能物理实验的需求, 如大型强子对撞机(LHC)、相对论重离子对撞机(RHIC)、国际直线对撞机(ILC)等大科学装置对探测器有百微米量级的位置分辨率、纳秒量级时间分辨率以及耐辐照等性能要求。当前, GEM探测器已广泛应用于基础科学研究^[2-4]、工业应用^[5-7]、实验核物理^[8-9]、天体物理学^[10-11]、医学物理^[12]和国土安全^[13]等多个领域。由于单层标准GEM的有效增益一般为 10^2 ^[14], 实验中通常会采用两层或多层级联的方式达到较高增益的目的^[15]。标准GEM对蚀刻技术的要求很高, 制作工序精细度较高, 工艺复杂。2002年, Breskin等^[16]在GEM结构基础上提出了一种使用传统印刷电路板技术就可以制作的厚型结构探测THGEM(THick Gas Electron

Multiplier), 单层THGEM的增益约为 $10^3 \sim 10^4$ ^[17], 通过级联方式可以获得更高的增益^[18-19]。2016年, Cortesi等^[20]在级联THGEM探测器的启发下, 提出一种为M-THGEM(Multi-layers Thick Gas Electron Multiplier)结构的厚型气体电子倍增器, 其采用多层印刷电路板技术生产, 将导电层和绝缘层(FR-4/Kapton/Kevlar等)交替压合而成。再进行机械钻孔, 并在镀铜电极腐蚀出环形绝缘环。M-THGEM与多重级联THGEM探测器相比, 具有多个连续雪崩区, 能够将上一个阶段中产生的绝大部分电子传输至下一个雪崩区, 能有效降低电离电子的损失、降低放电和打火概率。同时, 其在低气压和低电压工作条件下能够获得高增益并稳定运行, 特别是在低气压的纯惰性气体工作条件下, 这种表现更符合重离子径迹鉴别和活靶(Active Target)时间投影室(Time Projection Chamber)(AT-TPC)对探测器的需求^[21], 为未来开展相关实验提供一种较好的候选探测器。

目前, 国内高能所谢宇广团队等已经研制了M-THGEM成品, 并在传统流气式模式下展开了有效增益等性能的测试工作^[22]; 调研发现, 国内针对M-THGEM探测器本身的建模与模拟以及在低气压和无猝

收稿日期: 2018-10-30; 修改日期: 2019-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605086, 11875163); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3422); 湖南省教育厅基金资助项目(15B205, 18C0461)

作者简介: 魏鑫(1995-), 男, 湖南永州人, 在读硕士, 从事基于气体探测器的核探测研究; E-mail: weixin199511@foxmail.com

[†] 通信作者: 王晓冬, E-mail: wangxd@usc.edu.cn.

灭气体条件下,对工作气体为纯氮气的性能研究还未见公开报道,本工作将对不同环境下的M-THGEM探测器的性能进行蒙特卡罗模拟研究。

2 M-THGEM的建模与模拟研究

本工作使用的模拟软件主要是ANSYS与Garfield++^[23]。ANSYS是一款大型通用有限元分析软件,能够处理复杂的电极形状以及电介质。Garfield++是欧洲核子中心(CERN)研发,是专门用于模拟带电粒子在气体中输运行为的程序包,可获得带电粒子的位置、时间和动量等信息。本工作的模拟步骤:首先使用有限元软件ANSYS对探测器

进行建模模拟,其中设定的参数如下:FR-4的厚度为0.6 mm, Cu膜厚度为10,总厚度为1.23 mm(两层)和1.84 mm(三层),其中孔径和间距分别为0.5 mm和1.0 mm,镀铜电极上开有0.1 mm大小的rim^[20]。图1展示了二层和三层M-THGEM;通过网格化、计算并导出的详细的节点信息文件列表,包括:电场属性表ELIST.lis、空间位置NLIST.lis、材料属性表MPLIST.lis和估计电位PRNSOL.lis等4个文件;然后使用Garfield++调用从ANSYS中导出的节点信息文件,在探测器漂移区沿孔中心方向模拟发射初始电子,设置气体性质参数,通过镜像实现探测器内完整的电场分布,统计电子在不同位置下的信息,最后计算得到所需要的参数。

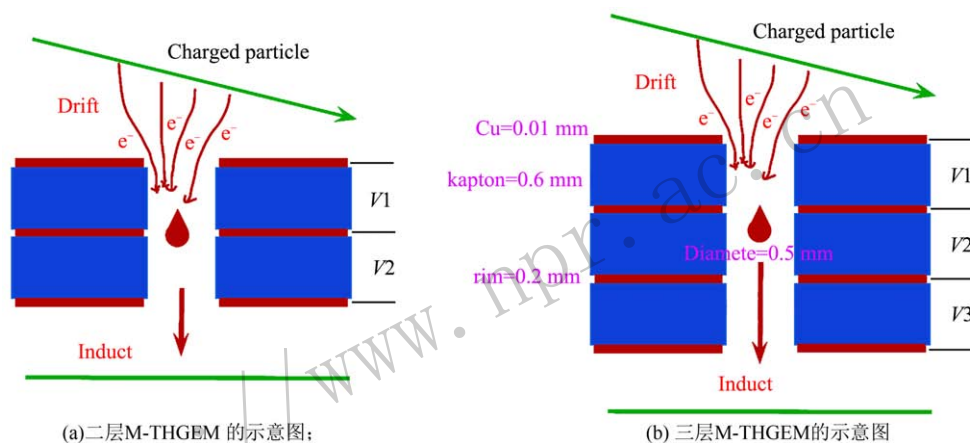


图 1 (在线彩图) 两种结构的M-THGEM示意图

二层与三层结构M-THGEM在ANSYS中的模型如图2(a)和(b)所示,模型建立后,对模型进行网格

化,在ANSYS中使用矢量分析计算,探测器电场分布的矢量图如图2(c)所示。

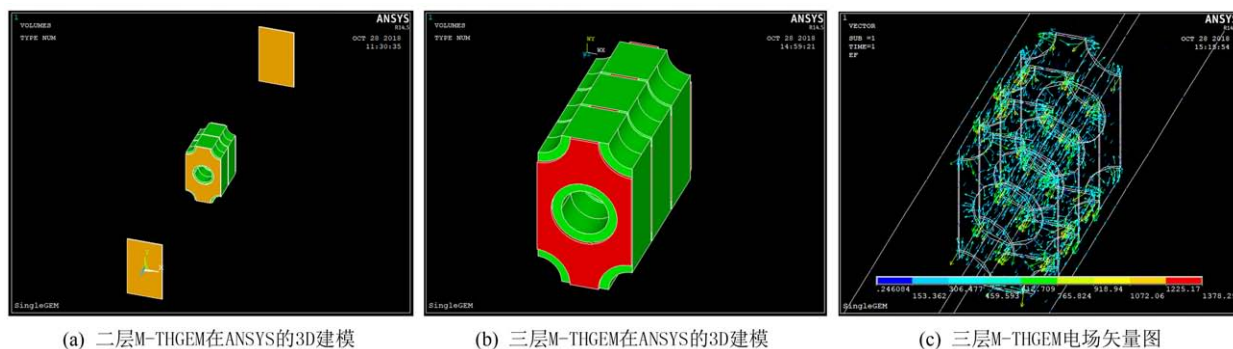


图 2 (在线彩图) M-THGEM在ANSYS中的3D建模

3 模拟结果

3.1 三层M-THGEM的场强分布

本次模拟中,电场参数设置为: E_d (漂移区场强)=500 V/cm, E_i (收集区场强)=500 V/cm。图3(a)

为场强在XY面的投影,探测器漂移电极位于 $Z=0.0$ cm, $Z=-0.5$ cm到 $Z=-0.7$ cm区域为M-THGEM的三层倍增区,颜色越深表示场强越大,可以发现三层倍增区的中心区域电场强最大。图3(b)为孔中心场强沿Z轴的投影($V_{GEM}=600$ V),孔中心的场强在Z轴方向上

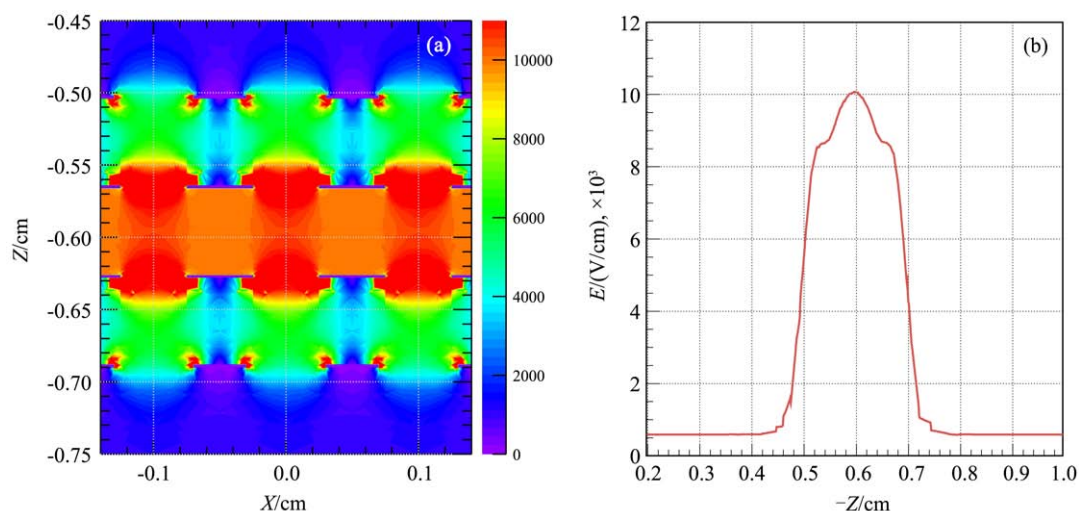


图 3 (在线彩图) 三层结构M-THGEM的场强分布

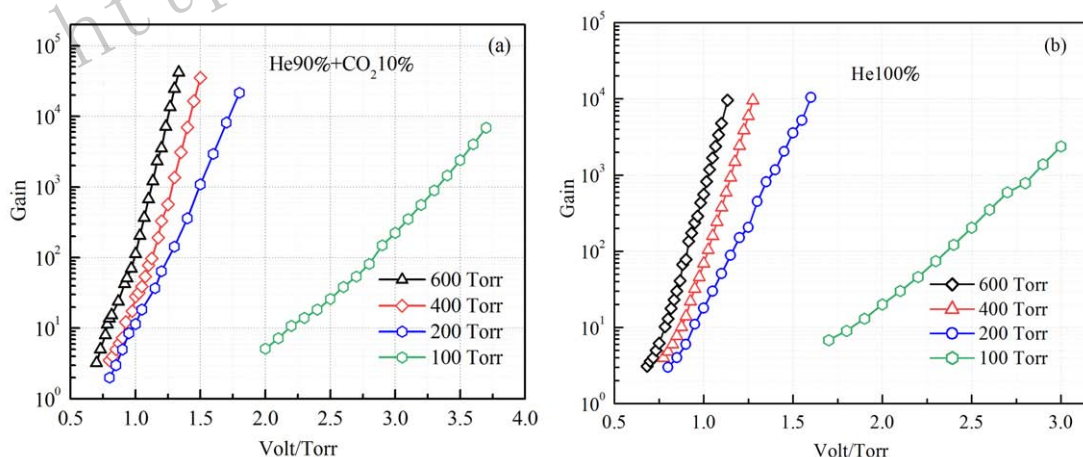
(a) M-THGEM的场强分布在 $Y=0$ 方向的投影; (b) M-THGEM探测器孔中心场强沿 Z 轴的投影 $V_{\text{GEM}}=600$ V。

呈对称分布, 当 $Z=0.6$ cm 时, 即探测器第二层中心, 场强达到了最大值。

3.2 增益随电压与气压比值的关系

本次模拟中设定漂移区场强 $E_d=1000$ V/cm, 收集区场强 $E_c=1500$ V/cm。图 4 为二层 M-THGEM 在不同低气压参数和不同电压与气压比值下 (Volt/Torr) 的增益曲线, 整体趋势为斜率随着气压值的降低而降低, 气压值为 600, 400 和 200 Torr (1 Torr=133.3 Pa) 时增益曲线的斜率变化程度不显著, 这表明 M-

THGEM 探测器在低气压、低电压下可以获得稳定的高增益, 增益对气压变化不敏感; 但在 100 Torr 的气压下, 增益曲线增速放缓, 这是因为在极低气压条件下, 单位体积内的气体原子或分子数目减少, 原初电离产生的电子数大幅度减少, 导致增益曲线的增速减小。如图 4(b) 所示, 当选取相同的 Volt/Torr 值, 工作气体为纯 He 气时, 增益均略高于图 4(a) 中的工作气体为 He90%+CO₂ 10% 的增益, 这是因为纯 He 的平均电离能要略小 ($W_{\text{He}} < 90\%W_{\text{He}} + 10\%W_{\text{CO}_2}$), 因此在相同沉积能量下会产生更多的原初总电离电子。

图 4 (在线彩图) 二层M-THGEM探测器在He90%+CO₂10%和纯He气下的增益曲线

三层 M-THGEM 的工作气体分别是 He90%+CO₂ 10% 混合气体及纯 He 气, 图 5 为其在不同 Volt/Torr 比值下的增益曲线, 其模拟条件与结果与二层结构的相似。比较图 4 与图 5 可以发现在相同的 Volt/Torr 值下, 三层结构的增益明显高于二层的, 这是由于三

层 M-THGEM 拥有更长的雪崩区, 更适合在低压工作条件运行。从图 6 中可以发现在相同 Volt/Torr 比值下, 三层 M-THGEM 探测器的增益比三层级联 THGEM 的增益高一个数量级以上 (工作条件为 He90%+CO₂10%, 600 Torr), 这意味着三层 THGEM 探测器相比, 达到

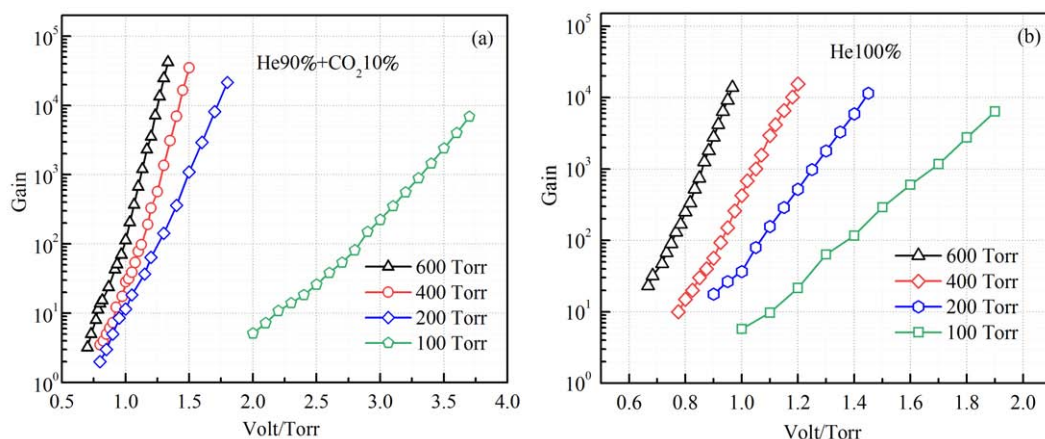


图 5 (在线彩图) 三层M-THGEM探测器在He90%+CO₂10%和纯He气下的增益曲线

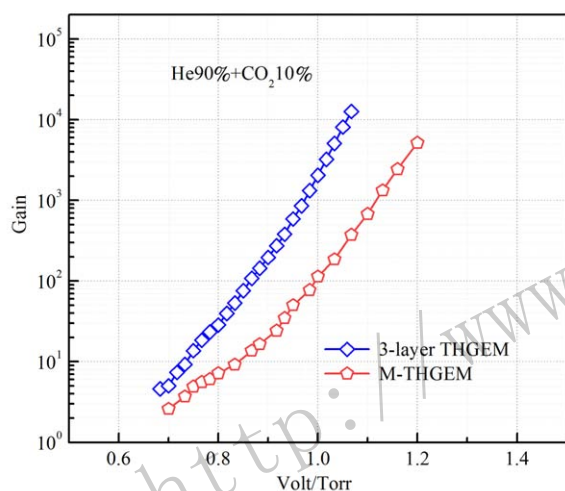


图 6 (在线彩图) 三层M-THGEM探测器与三层级联THGEM增益曲线

相同增益M-THGEM所需要工作电压更低, 这样探测器的打火概率也更低。模拟结果表明, M-THGEM在低气压下可以实现较高的增益, 在纯的He气体中也可以稳定工作, 满足实验中重离子径迹鉴别和AT-TPC等探测器的需求。

3.3 三层M-THGEM探测器的信号模拟研究

本工作中使用理想平板代替PCB板, 模拟了电子在探测器中的输运行为, 获得了探测器的感生信号。图7展示了三层M-THGEM探测器感应信号, 信号宽度在120 ns左右, 由两个部分组成, 前半部分主要由电子产生, 大量雪崩产生电子在向收集区运动时, 在PCB上感应出一个10 ns左右的信号; 后半部分主要由离子向漂移区运动时产生感应的100 ns左右的信号, 产生一个宽度为100 ns的拖尾。

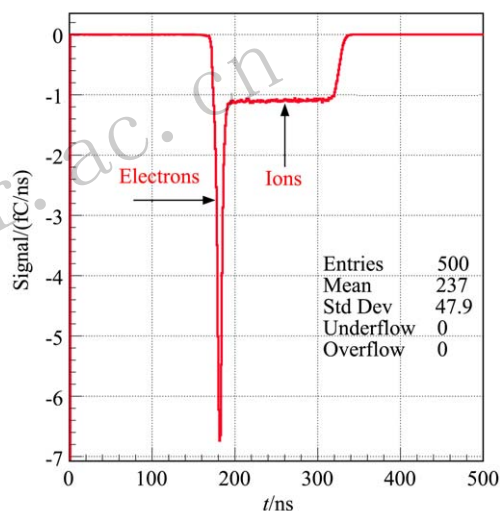


图 7 (在线彩图) 三层M-THGEM结构探测器的感应信号

3.4 非对称电压对M-THGEM探测器增益和正离子反馈率的影响

为抑制M-THGEM探测器的正离子反馈率, 本工作探索并研究了一种非对称电压施加方式, 具体原理是在探测器第一层膜上施加一个稍低的电压, 使其充当“正离子收集器”, 从而减少正离子回流到漂移区中的数目。图8(a)为该不对称电位施加方式的示意图(其中第一层膜的电压为第二层与第三层的膜电压 ΔV 的 ε 倍, $\varepsilon < 1$)。图8(b)为M-THGEM非对称电位配置中 ε 值与增益的函数曲线, (工作条件为He90%+CO₂ 10%的混合气体, 200 Torr), 可以发现随着 ε 值的降低, 获得相同增益则需要更高的电压; 当 $\varepsilon=0.7$ 时, 增益达到 10^4 , 与对称电位配置($\varepsilon=1$)相比, 膜电压 ΔV 仅增加了约40 V, 所以在相同增益下, 非对称电位施加方式需要的电压较低, 可以减少放电概率。

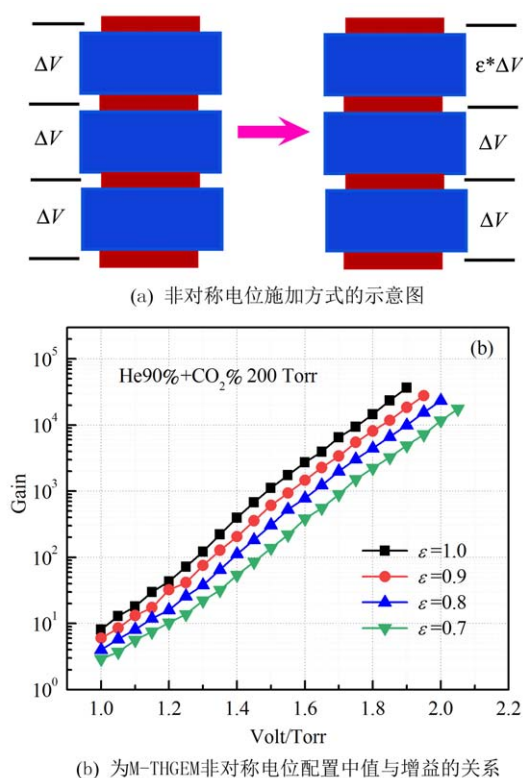
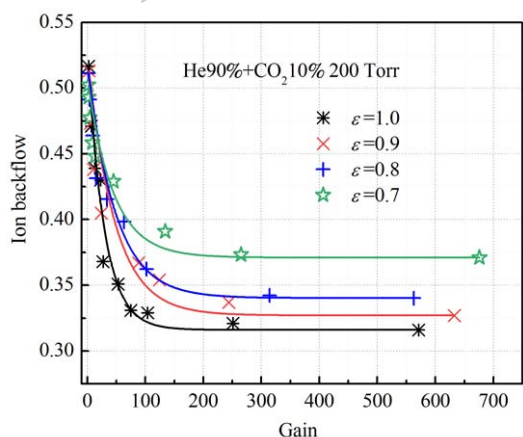


图 8 (在线彩图) M-THGEM 的电位施加方式的研究

图 9 显示随着 ε 的降低, 相同增益时正离子反馈率随着 ε 的降低而减小, 在 $\varepsilon=0.7$, 增益为 400 时, 正离子反馈率为 0.31; 而 $\varepsilon=1$ 时正离子反馈率为 0.38 左右。因为 ε 的降低, 使 M-THGEM 的第一个雪崩区的电压减少, 更多的正离子被吸收, 有效抑制了正离子反馈率。

图 9 (在线彩图) 不同 ε 值与正离子反馈率在不同增益下的函数曲线

4 结论

本文介绍了一种新型 M-THGEM 结构探测器与其工作原理, 使用了 ANSYS 和 Garfield++ 程序包对两

种几何结构的 M-THGEM 探测器的增益、感应信号、正离子反馈率等性能进行了模拟研究。模拟结果表明, 其在低气压、电压下均可以保持较高增益, 并且在纯 He 气也能够获得较高的增益。在相同条件下模拟比较了三层级联的 THGEM 与 M-THGEM 的增益, 结果表明, 在同一电压值下 M-THGEM 的增益比三级级联 THGEM 的增益高, 相同增益条件下, 所需电压更小, 有效减少了探测器的打火概率。探索并验证了非对称电压施加方式在不明显降低增益的情况下, 能有效降低正离子反馈率。本工作的研究能够给为后续的相关实验研究提供一些理论参考。

参考文献:

- [1] SAULI F. *Nucl Instr and Meth*, 1997, **386**(2): 531.
- [2] WANG Xiaodong, YANG Herun, REN Zonggou, *et al. Chinese Physics C*, 2015, **39**(2): 39.
- [3] WANG Xiaodong, ZHANG Junwei, HU Bitao, *et al. Chinese Physics Letters*, 2015, **32**(3): 30.
- [4] COIMBRA A E C, HENRIQUES C A O, ISRAELASHVILI I, *et al. Journal of Instrumentation*, 2017, **12**(1): P01013.
- [5] JOINER N, ESSER B, FERTIG M, *et al. Ceas Space Journal*, 2016, **8**(4): 1.
- [6] CORTESI M, ZBORAY R, ADAMS R, *et al. Journal of Instrumentation*, 2013, **8**(6): C10009.
- [7] ZBORAY R, ADAMS R, CORTESI M, *et al. Nuclear Engineering & Design*, 2014, **273**(2): 10.
- [8] WANG Tuo, ZHOU Jianrong, SUN Zhijia, *et al. Nucl Phys Rev*, 2014, **31**(1): 69. (in Chinese)
(周健荣, 孙志嘉, 吴冲, 等. *原子核物理评论*, 2014, **31**(1): 69.)
- [9] LIU Chuanfeng, ZHOU Xiaojuan, ZHOU Jianrong, *et al. Nucl Phys Rev*, 2018, **35**(1): 61. (in Chinese)
(刘川凤, 周晓娟, 周健荣, 等. *原子核物理评论*, 2018, **35**(1): 61.)
- [10] DALLA TORRE S. *Journal of Instrumentation*, 2013, **8**(10): C10020.
- [11] KIM J E, KO P, LEE K. *Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications* [M]. Singapore: World Scientific, 2012.
- [12] ISRAELASHVILI I, CORTESI M, VARTSKY D, *et al. JINST*, 2014, **10**(3): P03030.
- [13] VARTSKY D, ISRAELASHVILI I, CORTESI M, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2016, **824**(6): 240.
- [14] DONG Liyuan, QI Huirong, LI Yuhong, *et al. Nucl Phys Rev*, 2012, **29**(4): 379. (in Chinese)
(董丽媛, 祁辉荣, 李玉红, 等. *原子核物理评论*, 2012, **29**(4): 379.)
- [15] WI Kun, QI Huirong, ZHANG Yulian, *et al. Nucl Phys Rev*, 2015, **32**(3): 335. (in Chinese)
(魏堃, 祁辉荣, 张余炼, 等. *原子核物理评论*, 2015, **32**(3): 335.)
- [16] BRESKIN A, ALON R, CORTESI M, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2009, **598**(1): 107.
- [17] LU Liming, ZHOU Xiaojuan, ZHOU Jianrong, *et al. Nucl*

- Phys Rev, 2018, **35**(2): 172. (in Chinese)
(鲁黎明, 周晓娟, 周健荣, 等. 原子核物理评论, 2018, **35**(2): 172.)
- [18] SHALEM C, CHECHIK R, BRESKIN A, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **558**(2): 475.
- [19] CHECHIK R, BRESKIN A, SHALEM C, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **535**(1): 303.
- [20] CORTESI M, ROST S, MITTIG W, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2016, **88**(1): 123.
- [21] CORTESI M, YURKON J, MITTIG W, *et al.* Physics, 2015, **10**(9): P09020.
- [22] XIE Yuguang, PENG Zhiyuan, LI Genglan. Multilayer Thick GEM (M-THGEM)[R]. Annual Meeting of State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing, 26 Apr, 2018. (in Chinese)
(谢宇广, 彭志远, 李更兰. 多层厚GEM(M-THGEM)研制[R]. 2018年核探测与核电子学国家重点实验室年会, 北京, 2018-04-26.)
- [23] BALL M, ECKSTEIN K, GUNJI T. Journal of Instrumentation, 2014, **9**(04): C04025.

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

WEI Xin, WANG Xiaodong[†], CHENG Kai, DIAO Weizhuo, CHEN Guoxiang, HE Sanjun,
LI Tingting, ZHAO Yue, LIU Zheng

(University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Compared to THGEM (Thick Gas Electron Multiplier), the novel Multilayer Thick Gaseous Electron Multiplier (M-THGEM) has many advantages, such as continuous avalanche zone, more compact structure, high gain at low pressure and low operating voltage, and easy to make large-area production. In the presented work, two types of the M-THGEM detector (two or three layers) were modeled, and their main principle and performances were also studied by simulation. Two types of the detector were modeled and simulated by using the finite element software (ANSYS), and the electric field distribution and nodes information lists were figured out. The effective gain and induced signal from M-THGEM detector at different gas pressures and operating voltages were studied with the Garfield++ package. The simulation results shown that M-THGEM can obtain a stable higher gain around 10^5 in an environment where has a low pressure even in 200 Torr and within a pure inertia gas such as He. At this condition, the width of the induced signal from the three-layers structure is around 120 ns. Additionally, an asymmetric way of the applied voltage was studied and aim to reduce the efficiency of ion feedback, and our results show that this method is effective.

Key words: Garfield++; M-THGEM; Monte Carlo simulation; finite element method; gas electron multiplier

Received date: 30 Oct. 2018; **Revised date:** 31 Jan. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11605086,11875163); Natural Science Foundation of Hunan Province, China(2018JJ3422); Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China(15B205, 18C0461)

[†] **Corresponding author:** WANG Xiaodong, E-mail: wangxd@usc.edu.cn.