

四种基材国产厚型气体电子倍增器的模拟与性能研究

颜嘉庆<sup>1</sup>, 谢宇广<sup>2,3</sup>, 邓善桥<sup>1</sup>, 郑智阳<sup>1</sup>

- (1. 核工业二九〇研究所, 韶关 512026;
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)

**摘要:** 陶瓷基材厚型气体电子倍增器 (THGEM) 已被成功运用于中子探测. 用 Geant4 软件模拟研究和对比了陶瓷 (Ceramic)、Kapton (聚酰亚胺)、PTFE (聚四氟乙烯) 和 FR4 (环氧树脂) 基材对热中子散射和吸收. 基于国内电路板 (PCB) 厂生产的陶瓷-THGEM、Kapton-THGEM、PTFE-THGEM 和 FR4-THGEM 具有相同的几何参数, 孔径为 200  $\mu\text{m}$ , 孔间距 600  $\mu\text{m}$ , 厚度 200  $\mu\text{m}$ , 绝缘环宽度 75  $\mu\text{m}$ , 灵敏面积 50 mm $\times$ 50 mm, 用能量为 5.9 keV 的 X 射线源 <sup>55</sup>Fe 对他们分别都做了增益、长期稳定性和能量分辨率等方面的性能测试, 结果显示四种基材的 THGEM 都能正常工作. 单/双层陶瓷-THGEM 在 Ar + CO<sub>2</sub> = 80 : 20 的工作气体中的最大增益分别为  $1.2 \times 10^4$  和  $4 \times 10^4$ , 在 Ar + iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 97 : 3 工作气体中双层陶瓷-THGEM 能量分辨率好于 24.4%, 在 100 h 的连续测试中具有良好的增益稳定性. 用 <sup>239</sup>Pu  $\alpha$  源, 测试了陶瓷-THGEM 的  $\alpha$  粒子能量沉积和增益.

**关键词:** 厚型气体电子倍增器; 陶瓷基材; 热中子

**中图分类号:** TL82      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.055001

Simulation and performance study on the four type substrates of domestic thick gaseous electron multiplier

YAN Jia-Qing<sup>1</sup>, XIE Yu-Guang<sup>2,3</sup>, DENG Shan-Qiao<sup>1</sup>, ZHEN Zhi-Yang<sup>1</sup>

- (1. No. 290 Institute of Nuclear Industry, Shaoguan 512026, China;
2. State Key Laboratory of Nuclear Detection and Nuclear Electronics, Beijing 100049, China;
3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Ceramic-based Thick Gaseous Electron Multipliers (THGEMs) have been successfully applied to neutron detection. The influences of ceramic, FR4, kapton, and PTFE substrates on the thermal neutron scattering and absorption were studied and compared by Geant4 software. The ceramic-THGEMs, FR4-THGEMs, kapton-THGEMs and PTFE-THGEMs are homemade in PCB factory, which have the same geometric parameters such as aperture of 200  $\mu\text{m}$ , hole spacing of 600  $\mu\text{m}$ , thickness of 200  $\mu\text{m}$ , insulation ring width of 80  $\mu\text{m}$ , and sensitive area of 50 mm  $\times$  50 mm. The gas gain, energy resolution and gain stability were measured using 5.9 keV X-rays, four different type substrates THGEM can work normally. The maximum gain of a single and double layer ceramic THGEMs reach  $1.2 \times$

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(11205173)

作者简介: 颜嘉庆(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事核技术方面工作. E-mail: 404612935@qq.com

$10^4$  and  $4\times 10^4$  in  $\text{Ar} + \text{CO}_2=80:20$ , respectively. The energy resolution is better than 24.4% in  $\text{Ar} + \text{iC}_4\text{H}_{10}=97:3$ . Good gain stability was obtained during a more than 100 hours continuous test. By using a  $^{239}\text{Pu}$  source, the alpha deposited energy spectrum and gain curve of the ceramic THGEM were measured.

**Keywords:** THGEM; Ceramic substrate; Thermal neutron

# 1 引言

厚型气体电子倍增器(Thick Gaseous Electron Multiplier, THGEM)是通过在传统气体电子倍增器(Gaseous Electron Multiplier, GEM)的基础上发展起来的一种新型微结构气体探测器(Micro-Pattern Gaseous Detector, MPGD)<sup>[1-2]</sup>. THGEM 是由印制线路板(PCB)工厂通过在 FR4(环氧树脂)或其他绝缘材料板(如 Kapton(聚酰亚胺)、PTFE(聚四氟乙烯)和陶瓷(Ceramic)等)进行钻孔和蚀刻生产出来的<sup>[3-5]</sup>. 且具有制作简单、增益较高、能量分辨率好、价格低廉、抗打火性能极好且易于大面积制作等特点,在同步辐射成像和粒子物理实验等领域有着广阔的应用前景,如探测切伦科夫辐射光环、带电粒子径迹、中子等<sup>[6-9]</sup>.

中子通常被用来研究物质结构和动力学信息. 近年来,许多机构致力于推动下一代中子设施的发展,包括美国的 SNS、日本的 J-PARC、英国的 I-SIS、中国的 CSNS(中国散裂中子源)和欧洲的 ESS<sup>[10]</sup>. 中子探测器是中子散射装置的关键部件之一. 随着新一代中子源的国际发展,基于 He-3 的传统中子探测器已经不能很好地满足高通量应用的需求,同时也面临着全球 He-3 供应危机. 研究新型中子探测器取代基于 He-3 的中子探测器技术已迫在眉睫. 本文基于国内 PCB 厂研制出的

FR4-THGEM、PTFE-THGEM、Kapton-THGEM 和陶瓷-THGEM,研究哪种基材的 THGEM 更适合探测中子,也为今后设计基于 THGEM 的中子探测器提供参考.

# 2 四种基材 THGEM 的介绍

本文所用的国产陶瓷、PTFE、FR4 和 Kapton 基材 THGEM 都具有相同的几何参数(孔径 200  $\mu\text{m}$ ,孔间距 600  $\mu\text{m}$ ,厚度 200  $\mu\text{m}$ ,绝缘环宽度 75  $\mu\text{m}$ ,灵敏面积 50 mm $\times$ 50 mm),如图 1 所示. 但四种基材的颜色却不相同,样品如图 2 所示. 陶瓷-THGEM 的基材颜色为白色,PTFE-THGEM 的基材颜色为紫黑色,Kapton-THGEM 的基材颜色为橙色,FR4-THGEM 的基材颜色为绿色.

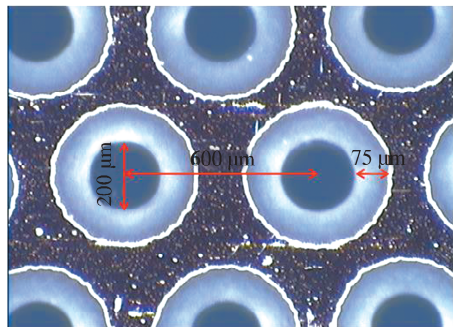
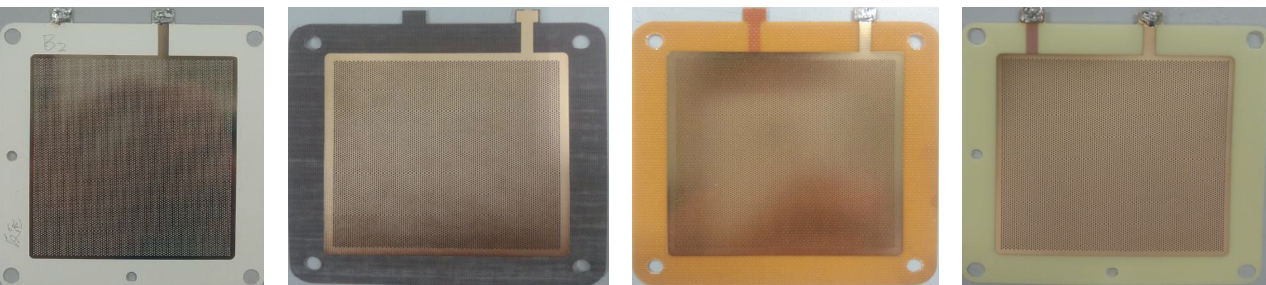


图 1 国产 THGEM 微孔结构  
Fig. 1 Microporous structure of domestic THGEM



陶瓷-THGEM                      PTFE-THGEM                      Kapton-THGEM                      FR4-THGEM

图 2 四种基材 THGEM 的样品照片(线上彩色)  
Fig. 2 Sample photos of THGEM with four substrates(color online)

陶瓷基材通常具有低中子散射、低放气性和低内部放射性<sup>[5]</sup>的特点. 这些特点有利于它作单光子和中子探测,例如,气体光电倍增器(GPMs)和

热中子束监视器. PTFE 基材因其在各种环境中的稳定性而闻名<sup>[4]</sup>,这种基材几乎没有放射性,可以在低温条件下正常工作. 这些特点使其可用于

VUV/UV 探测、契伦科夫光环成像,特别是针对低本底暗物质实验中的低温液氙液氫闪烁光的探测. 传统的 GEM 是基于 Kapton 基材通过化学腐蚀 PCB 板的工艺制作而来的. 最初,FR4 基材是国产 THGEM 常用的基材,这说明 FR4 基材和 Kapton 基材也比较适合于微孔阵列探测器的制作.

氢元素对热中子散射截面最高,散射截面为 47.7b,远大于其他元素的散射截面. Kapton 是由聚酰亚胺制作而来,H 元素的含量为 2.6%. FR4 是由环氧树脂制作而来,H 元素的含量为 1.3%. PTFE 是由聚四氟乙烯制作而来,主要含 C 元素和 F 元素,H 元素的含量几乎为零. 陶瓷基材是复合型材料,纯陶瓷主要是由粘土、石英和长石组成,而陶瓷基材则是由 90%的纯陶瓷和 10%的玻璃纤维混合而成. 如表 1 所示,陶瓷基材含量最高的元素是氧元素,约占 43.5%,而热中子散射截面最高的氢元素在陶瓷基材所有元素里所占的比例几乎为零,导致陶瓷基材的热中子散射截面仅为 3.8b. 由此可见,陶瓷基材和 PTFE 基材对热中子散射要低于其他两种基材.

表 1 陶瓷基材的物质含量

Tab. 1 Material contents of ceramic substrate

物质	O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	玻璃纤维
含量 / %	43.5	30.3	8	2	0.1	0.2	2.4	4.5	10

3 Geant4 模拟

对于中子探测,空间分辨一般要求在毫米量级水平,这对于 THGEM 中子探测器是非常有利的. 但是,THGEM 中子探测器对中子的探测效率是一个至关重要的问题. 这种问题通常通过在 THGEM 上镀中子转换层的级联结构来解决,如图 3 所示. 在探测热中子和慢中子时,THGEM 基材对中子的散射和吸收必须得考虑. 相对于 THGEM 中子探测器电场分布情况而言,在 THGEM 下表面镀一层 2 μm 厚度的<sup>10</sup>B(2 μm 厚度也是最合理的厚度),会更有利于气体的电离和电子的入孔.

3.1 热中子散射和吸收模拟

热中子的损失一般包括散射和吸收两部分. 通过使用 Geant4<sup>[11]</sup>软件和参考低能中子相互作用的物理参数列表(QGSP\_BERT\_HP)<sup>[12]</sup>,可以模

拟出陶瓷基材、FR4 基材、Kapton 基材和 PTFE 基材对热中子的散射和吸收影响. 用 Geant4 模拟时,中子的能量设为  $25 \times 10^{-3}$  eV,此为典型的热中子能量值. 在真空环境中,感应板或收集板放在距基材 2 mm 处,基材设置为无孔. 图 4 展示的是陶瓷基材、FR4 基材、PTFE 基材和 Kapton 基材对热中子的吸收和散射与基材厚度的关系. 从图 4 可以看出,热中子的散射率和吸收率与四种基材的厚度成正比. 热中子的散射率是吸收率的 100~200 倍,所以基材对热中子的损失影响主要是散射而不是吸收. 其中,对热中子的散射率和吸收率都最少的是陶瓷基材,其次是 PTFE 基材,而这两种基材对热中子的散射率几乎相同. THGEM 探测器在探测慢中子时,要考虑到基材对热中子的散射概率和吸收概率,而陶瓷基材对热中子的损失率比其他三种基材低.

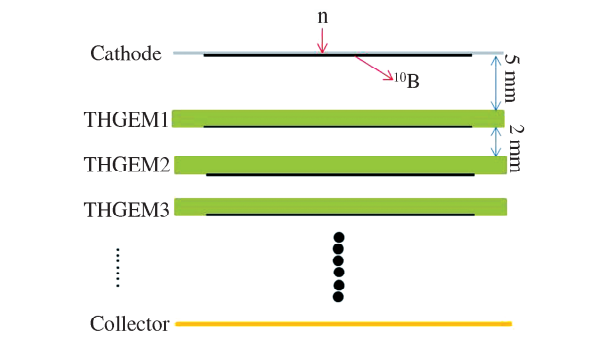


图 3 THGEM 中子探测器的原理图  
Fig. 3 Schematic view of the THGEMs neutron detection

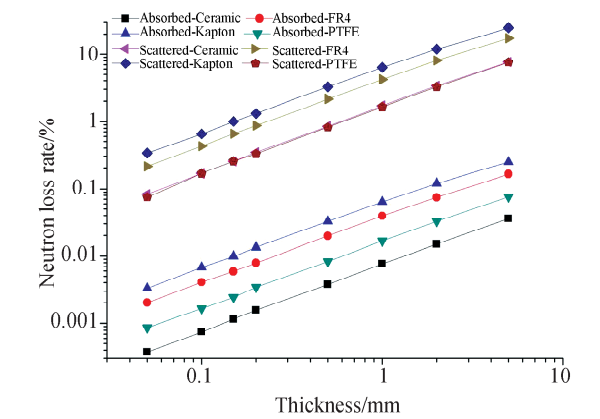


图 4 四种基材对热中子的吸收和散射与基材厚度的关系  
Fig. 4 Thermal neutron absorptions and scattering ratios as a function of the thicknesses for the four substrates

3.2 中子探测效率模拟

由于 α 粒子使空气电离产生的原初电子比 X 射线高 10<sup>3</sup> 倍,因此 THGEM 探测器对中子的探测效率主要由 n-α 的转换效率决定. 用 Geant4 模

拟<sup>10</sup>B 的厚度与 n-α 转换效率的关系,热中子从垂直<sup>10</sup>B 层的中心入射,中子的能量设为  $25 \times 10^{-3}$  eV. 在真空环境中,感应板或收集板放在距<sup>10</sup>B 层下表面 0.3 mm 的地方来收集 α 粒子,四种基材厚度为 0.2 mm 且无孔. 如图 5 所示,刚开始 n-α 转换效率随着<sup>10</sup>B 层厚度的增加呈指数增长. 当<sup>10</sup>B 层厚度为 2.5 μm 时,n-α 转换效率达到最大,约为 3%. 随着<sup>10</sup>B 层厚度的不断增加,越来越多转换出来的 α 粒子被<sup>10</sup>B 吸收,而不能释放到工作气体中,所以转换效率缓慢地降低,而不是继续增大,这一过程由<sup>10</sup>B 自身所决定.

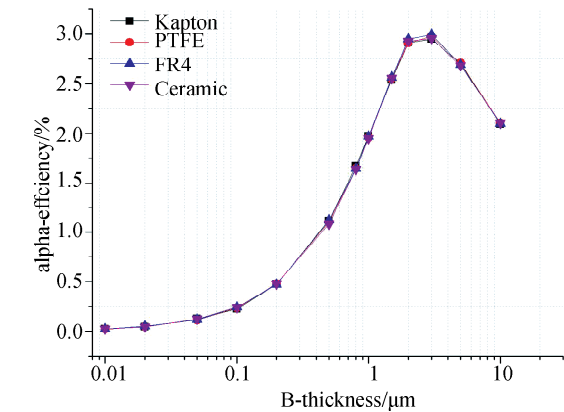


图 5 n-α 转换效率与<sup>10</sup>B 层厚度的关系  
Fig. 5 The n-α conversion efficiency as a function of the thickness of <sup>10</sup>B

4 THGEM 实验测试

如图 6 所示为由阴极、阳极和单/双层 THGEM 组成的探测器测试腔室,THGEM 安装在聚乙烯(PE)框架上,并放入密不透气的有机玻璃(PMMA)腔室中. THGEM 探测器的测试是在常温常压条件下的流动混合气体中进行. <sup>55</sup>Fe X 射线源(10 mCi)被放在测试腔室的顶部并用直径为 2 mm 的通孔进行准直. <sup>55</sup>Fe 产生的 5.9 keV X 射线与 Ar 原子相互作用产生的电离电子在 THGEM 空穴中以雪崩模式放大,然后进入感应区,最后被阳极收集. 所有电极均采用 CAEN SY127 高压电源进行加压,用 ORTEC 142 前置放大器(电荷灵敏度为 1 V/pC)和 ORTEC 572A 放大器(整形时间 2 μs)以及 ORTEC 916 多通道分析仪(MCA)以脉冲计数模式记录信号<sup>[13-14]</sup>.

测试国产陶瓷、PTFE、Kapton 和 FR4 基材 THGEM 工作性能的参数:漂移区场强  $E_d=1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,气体厚度 5 mm,传输区场强  $E_t=1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,层与层间隙 2 mm,感应区场强  $E_i=4 \text{ kV} \cdot$

$\text{cm}^{-1}$ ,感应间隙 2 mm;THGEM 电压  $U_{\text{THGEM}}$  根据气体和 THGEM 的厚度而变化,一般有 100 V 左右的工作区间;增益测试时,加压步长为 10 V 或 20 V 电压.

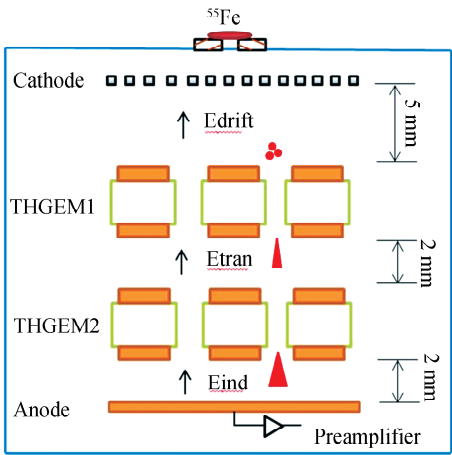


图 6 THGEM 测试腔室的原理图  
Fig. 6 Schematic diagram of THGEM test chamber

4.1 THGEM 增益测试

通过用能量为 5.9 keV 的 X 射线源<sup>55</sup> Fe,对单/双层陶瓷-THGEM、单/双层 PTFE-THGEM、单/双层 FR4-THGEM 和单/双层 Kapton-THGEM 分别在 Ar + CO<sub>2</sub> = 80 : 20 工作气体中进行增益测试,我们发现 Ar+CO<sub>2</sub> 气体是绿色气体,无毒无害,且不易燃烧,可广泛应用于 THGEM 的性能测试. 四种不同基材 THGEM 增益曲线见图 7.

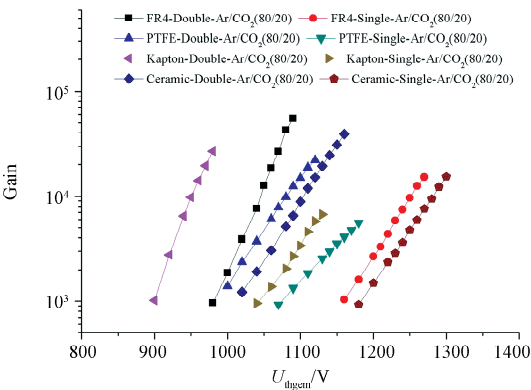


图 7 四种基材 THGEM 的增益  
Fig. 7 The gains of THGEMs with four substrates

在 Ar+CO<sub>2</sub> = 80 : 20 的工作气体中,双层增益最高的是 FR4-THGEM,增益高达  $5.5 \times 10^4$ ;其次是双层 Ceramic-THGEM,增益高达  $3.9 \times 10^4$ . 单层增益最高的是 FR4-THGEM,增益高达  $1.5 \times 10^4$ ;其次是单层 Ceramic-THGEM,增益高达  $1.2 \times$



$10^4$ . 单层与双层增益大约相差 3~4 倍. 整体而言, 这四种基材 THGEM 在  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  的工作气体中增益线性都比较好, 而且工作电压区间也高于 100 V.

4.2 THGEM 长期稳定性测试

本文采用  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  工作气体, 对双层陶瓷-THGEM、双层 PTFE-THGEM、双层 Kapton-THGEM 和双层 FR4-THGEM 进行连续 100 h 以上的增益稳定性测试. 测试过程中每隔 10 min 取一次  $^{55}\text{Fe}$  的能谱图, 拟合全能峰得到增益, 结果如图 8 所示.

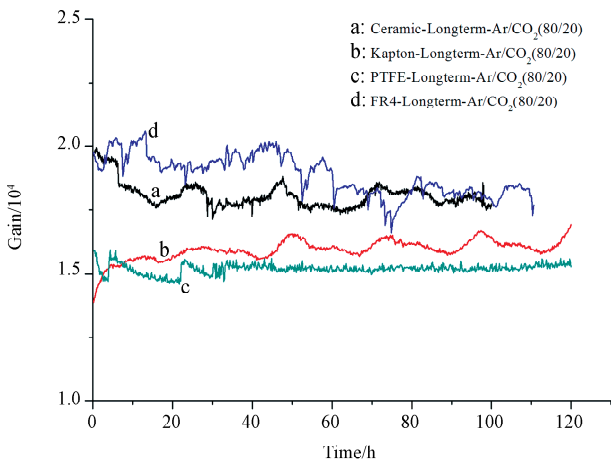


图 8 四种基材 THGEM 的长期稳定性  
Fig. 8 Long-term stabilities of four substrates THGEM

从图 8 我们分别可以看到, 双层陶瓷-THGEM 增益从  $1.9 \times 10^4$  缓慢下降, 在 6 h 后, 增益基本维持在  $1.8 \times 10^4$  左右, 此后一直在该值附近上下浮动. 在 6 h 后的工作时段内, 增益变化处于  $1\,700/18\,000 = 9.44\%$  水平. 双层 PTFE-THGEM 增益基本维持在  $1.9 \times 10^4$  左右, 此后一直在该值附近上下浮动, 在工作时段内增益变化处于  $3\,500/19\,000 = 18.42\%$  水平. 双层 Kapton-THGEM 增益从  $1.3 \times 10^4$  缓慢上升, 在 3 h 后, 增益趋于平稳, 基本维持在  $1.5 \times 10^4$  左右, 此后一直在该值附近上下浮动; 在 3 h 后的工作时段内, 增益变化处于  $1\,900/15\,000 = 12.67\%$  水平. 双层 FR4-THGEM 在整个工作时段内增益都趋于平稳, 基本维持在  $1.5 \times 10^4$  左右, 此后一直在该值附近上下浮动, 整个工作时段内增益的变化处于  $1\,000/21\,000 = 4.76\%$  水平.

总之, 四种不同基材 THGEM 的长期稳定性都在正常范围内. 无论是达到稳定所需时间, 还是稳定期间的波动变化, FR4-THGEM 的长期稳定

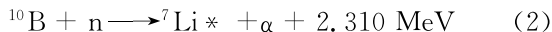
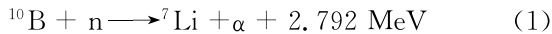
性都要好于其他三种基材 THGEM, 其次是陶瓷-THGEM. 但是, 四种基材 THGEM 更长时间的增益稳定性还需要实际的应用来检验.

4.3 THGEM 能量分辨率测试

$5.9\text{ keV}^{55}\text{Fe}$  的 X 射线能够在以氩气为基底的工作气体中激发出全能峰和逃逸峰, 且两峰位恰好相差一倍, 因此它是测量气体探测器能量分辨的理想手段. 本文在  $\text{Ar} + \text{iC}_4\text{H}_{10} = 97 : 3$  工作气体中, 测试了双层陶瓷-THGEM、双层 PTFE-THGEM、双层 Kapton-THGEM 和双层 FR4-THGEM 的能量分辨率, 得到如图 9 所示的  $^{55}\text{Fe}$  能谱图. 用单高斯对全能峰进行拟合得到方差, 通过公式  $\text{FWHM} = 2.35\sigma$  得到半高宽, 从而能量分辨 =  $\text{FWHM} / \text{Peak} \times 100\%$ , 此处 Peak 是全能峰的峰位. 双层陶瓷-THGEM 的能量分辨约为  $24.4\%$ , 双层 PTFE-THGEM 的能量分辨约为  $25.3\%$ , 双层 Kapton-THGEM 的能量分辨约为  $32.7\%$ , 双层 FR4-THGEM 的能量分辨约  $23.7\%$ . 四种基材 THGEM 的能量分辨率为气体探测器能量分辨的正常水平, 其中能量分辨率最好的是 FR4-THGEM, 其次是陶瓷-THGEM.

4.4  $\alpha$  响应

结实耐用和亚毫米空间分辨的 THGEM 同样适用于快中子和慢中子探测. 由于中子不能通过气体电离探测, 所以基于 THGEM 的中子探测器必须结合一些中子转换层. 而  $^3\text{He}$ 、 $^{10}\text{B}$ 、 $^6\text{Li}$  和  $^3\text{He}$  气体的价格昂贵, 因此, 近年来人们致力于寻找另一种中子探测的有效方法, 如级联结构的 THGEM 探测器. 对于热中子,  $^{10}\text{B}(\alpha, n)$  转换层是一个非常好的选择. 它与中子反应如式(1)~式(3)所示.



$^{10}\text{B}$  吸收中子放出能量为 1.78 和 1.47 的  $\alpha$  粒子. 对于 THGEM 自身而言, 需要探测的是  $\alpha$  粒子, 它能产生比 X 射线更多的电离电子, 这意味着对于中子探测不需要很高的增益. 由于中子束流夹杂着很高的  $\gamma$  射线本底, 所以探测效率和  $n/\gamma$  鉴别能力对基于 THGEM 的中子探测器非常重要. 图 10 (b) 增益曲线展示的是在  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  的工作气体中分别用  $^{55}\text{Fe}$  X 射线源和  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  粒子源来测试双层陶瓷-THGEM. 其中, 漂移区间距 5 mm, 感应区间距 2 mm, 板间距 2 mm. 从图 10(b)

中可以很清楚地看出,达到相同的 ADC 道数 5.5 MeV  $\alpha$  粒子源测试所需电压比 5.9 keV  $^{55}\text{Fe}$  X 射线低了大约 300 V. 因此,通过调节增益和操作电压,能将中子信号与 X 射线区分开. 众所周知,光电效应发生在光子能量低于 10 MeV 的情况下,且

随着能量的增加反应截面会减少,所以高能量 (MeV) 的  $\gamma$  光子本底比 X 射线产生的电离电子数要低. 图 10(a)是在电压为 790 V,增益为 96 时 5.5 MeV  $\alpha$  粒子能谱图, $\alpha$  粒子能量沉积谱是分布非常清楚的朗道分布.

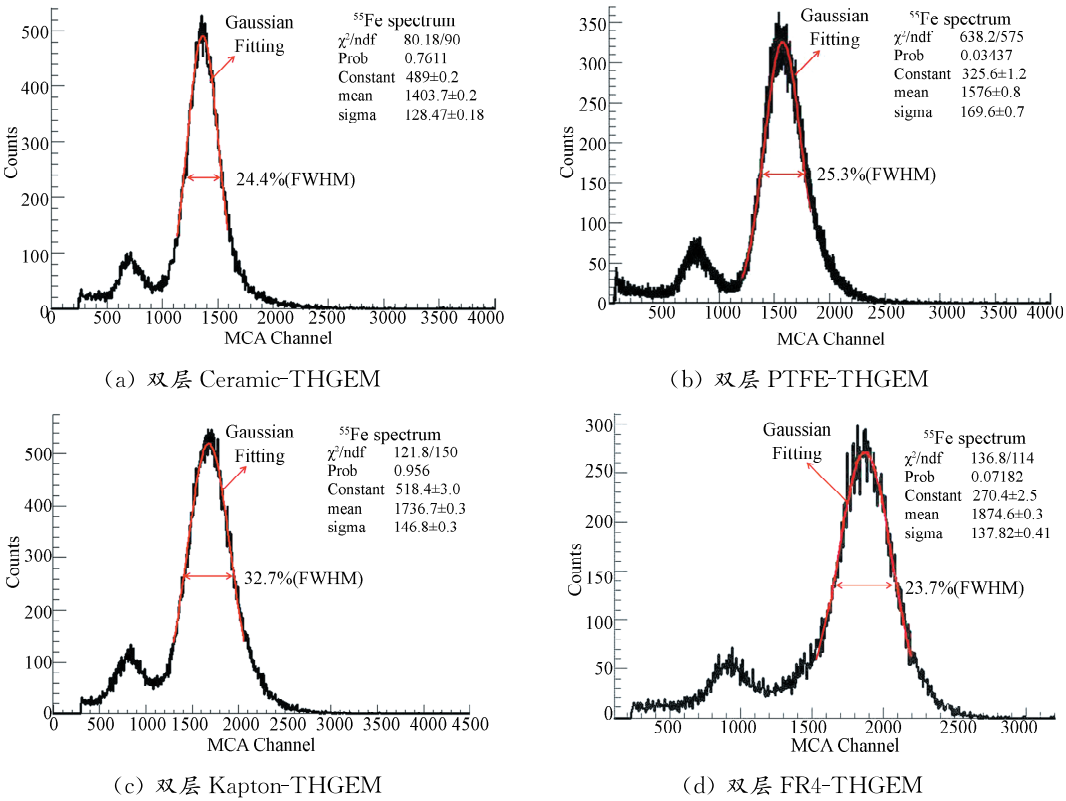


图 9 四种基材 THGEM 的能量分辨率  
Fig. 9 The energy resolutions of the four substrates THGEM

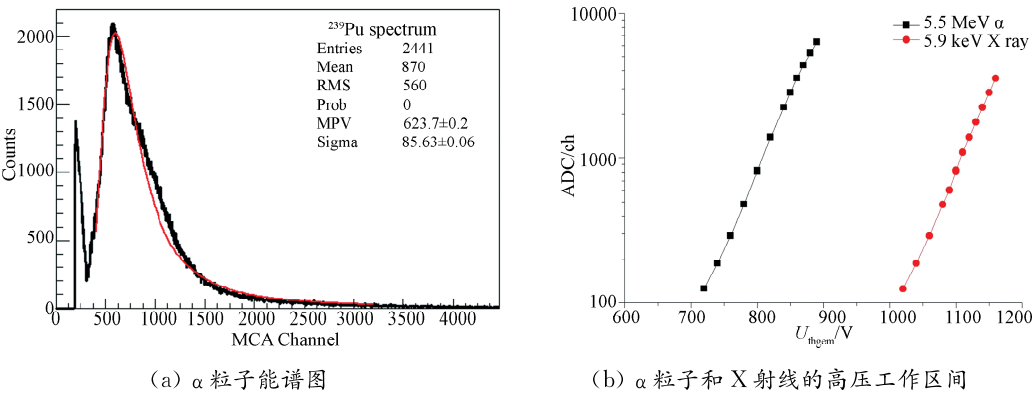


图 10 双层陶瓷 THGEM 在  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  的测试结果  
Fig. 10 Test results for  $\alpha$  particles in  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$

5 总 结

THGEM 探测器是一种特别优秀的微结构气体探测器,其增益较高,且抗打火能力很强,造价相对低廉,大面积制作容易,具有很大的研究价值.

对陶瓷-THGEM、Kapton-THGEM、PTFE-THGEM 和 FR4-THGEM 用 Geant4 模拟了中子探测效率和中子损失率,并对以上四种基材 THGEM 进行了性能测试. 测试结果显示四种基材 THGEM 都能正常工作,陶瓷-THGEM 的各项性

能仅次于 FR4-THGEM, 但其中子损失率仅是 FR4-THGEM 的  $1/3\sim 1/2$ , 如表 2 所示. 因此, 国产陶瓷-THGEM 在热中子探测方面具有很好的性能.

表 2 四种基材 THGEM 的实验验证与模拟结果  
Tab. 2 The experimental and simulation results of four substrates THGEM

种类	热中子损失率/%(基材 200 $\mu\text{m}$ 厚)	双层最高增益	双层能量分辨率/%	双层长期稳定性波动比例/%(工作时长 $>100\text{ h}$ )
陶瓷-THGEM	0.3	$3.9\times 10^4$	24.4	9.4
PTFE-THGEM	0.3	$2.2\times 10^4$	25.3	18.4
Kapton-THGEM	1.3	$2.6\times 10^4$	32.7	12.7
FR4-THGEM	0.8	$5.5\times 10^4$	23.7	4.8

由 Geant4 模拟显示, 损失率主要由散射造成, 而不是由吸收造成. 单/双层陶瓷-THGEM 分别在  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  的工作气体中最大增益为  $1.2\times 10^4$  和  $4\times 10^4$ ; 双层陶瓷-THGEM 在  $\text{Ar} + \text{iC}_4\text{H}_{10} = 97 : 3$  的工作气体中能量分辨率高于  $24.4\%$ ; 双层陶瓷-THGEM 在  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  的工作气体中至少能正常工作  $100\text{ h}$ , 且增益波动性好于  $9.44\%$ . 其中,  $\text{Ar} + \text{CO}_2 = 80 : 20$  是中子探测器最常用的工作气体. 当用  $^{239}\text{Pu}$   $\alpha$  源, 陶瓷-THGEM 展示了很好的  $\alpha$  响应. 由于  $\alpha$  粒子和 X 射线存在  $300\text{ V}$  高压操作范围的差异. 所以中子信号很容易区分  $\gamma$  射线本底.

薄基材和高灵敏面积的陶瓷-THGEM 将是今后的研究重点. 对于实际应用, 理想的厚度为  $0.1\text{ mm}$ , 灵敏面积将大于  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ .

参考文献:

[1] Monteiro C M, Fernandes L M, Veloso J F, *et al.* Secondary scintillation yield from GEM and THGEM gaseous electron multipliers for direct dark matter search [J]. Phys Lett B, 2012, 714: 18.  
[2] Li Z Y, X Y, Xie Y G, *et al.* Study on gain stability of thick gas electron multiplier [J]. Nucl Instrum Meth A, 2021, 986: 164534.

[3] Xie Y, Lü G, Zhang A, *et al.* Development of Au-coated THGEM for single photon, charged particle, and neutron detection [J]. Nucl Instrum Meth A, 2013, 729: 809.  
[4] Xie W Q, Li Y L, Li Y J, *et al.* Performance study of the PTFE-THGEM at room and low temperature [J]. Chinese Phys C, 2013, 37: 116001.  
[5] Yan J Q, Xie Y G, Hu T, *et al.* Simulation and performance study of ceramic THGEM [J]. Chinese Phys C, 2015, 39: 66.  
[6] Ezeribe A C, Eldridge C, Lynch W, *et al.* Demonstration of ThGEM-multiwire hybrid charge readout for directional dark matter searches [J]. Nucl Instrum Meth A, 2021, 987: 47.  
[7] Alexeev M, Birsar R, Bradamante F, *et al.* Progress towards a THGEM-based detector of single photons [J]. Nucl Instrum Meth A, 2011, 639: 130.  
[8] Breskin A, Peskov V, Cortesi M, *et al.* CsI-THGEM gaseous photo multipliers for RICH and noble-liquid detectors [J]. Nucl Instrum Meth A, 2011, 639: 117.  
[9] Alexeev M, Birsar R, Bradamante F, *et al.* THGEM based photon detector for Cherenkov imaging applications [J]. Nucl Instrum Meth A, 2010, 617: 396.  
[10] He Z Y, Zhou J R, Sun Z J, *et al.* Experimental studies of THGEM in different Ar/CO<sub>2</sub> mixtures [J]. Chinese Phys C, 2014(5): 58.  
[11] 鄢雨璐, 张乐, 刘书魁, 等. 基于 Geant4 模拟的康普顿散射研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 749.  
[12] 马善乐, 杨兰兰, 屠彦, 等. 气体电子倍增器透过率和增益特性的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33: 228.  
[13] 颜嘉庆, 谢宇广, 胡涛, 等. 基于国产厚型气体电子倍增器的低能电子二维位置探测器[J]. 核技术, 2016, 39: 52.  
[14] Zhang A W, Yu B X, Xie Y G, *et al.* Experimental study of a THGEM detector with mini-rims [J]. Chinese Phys C, 2012, 36: 142.

引用本文格式:  
中 文: 颜嘉庆, 谢宇广, 邓善桥, 等. 四种基材国产厚型气体电子倍增器的模拟与性能研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 055001.  
英 文: Yan J Q, Xie Y G, Deng S Q, *et al.* Simulation and performance study on the four type substrates of domestic thick gaseous electron multiplier [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2021, 58: 055001.