

文章编号: 1007-4627(2018)02-0172-07

## 应用于热中子的 nTHGEM 探测器性能研究

鲁黎明<sup>1,2,3</sup>, 周晓娟<sup>2,3</sup>, 周健荣<sup>2,3</sup>, 蒋兴奋<sup>2,3</sup>, 朱林<sup>1,2,3</sup>, 何聪<sup>1,2,3</sup>, 谭莹莹<sup>1,2,3</sup>, 杨桂安<sup>2,3</sup>,  
夏远光<sup>2,3</sup>, 谢宇广<sup>2,3,4</sup>, 郑波<sup>1,†</sup>, 王晓冬<sup>1</sup>, 陈元柏<sup>2,3,4</sup>, 孙志嘉<sup>2,3,4,†</sup>

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 东莞中子科学中心, 广东 东莞 523803;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

**摘要:** 随着脉冲强流中子源的发展, 对高性能中子探测器提出了更大的挑战,  $^3\text{He}$  气体资源严重短缺和高计数率中子探测器的迫切需求, 已开始制约着中子源应用技术的发展。中国科学院高能物理研究所针对中子的特殊性, 专门研发了一种陶瓷基材的 nTHGEM(neutron Thick Gaseous Electron Multiplier) 探测器用于中子探测。基于 nTHGEM 的中子探测器具有高计数率、高位置与时间分辨能力、增益大、制作工艺简单, 且便于大面积制作的特点, 是目前国际上发展替代  $^3\text{He}$  探测技术的重要方向之一。为了详细研究 nTHGEM 探测器的本身性能, 本工作使用  $^{55}\text{Fe}$  放射源研究了 nTHGEM 探测器的增益、计数率稳定性、能量分辨率等关键参数与 nTHGEM 膜间电压、收集场强、漂移场强之间的关系, 优化了 nTHGEM 探测器在不同工作气体中的工作参数, 为后续进一步优化 nTHGEM 探测器设计和工艺奠定了基础。实验结果表明, 单层 nTHGEM 探测器在  $\text{Ar}(90\%)+\text{CO}_2(10\%)$  混合气体中增益能达到  $10^3$ , 探测器计数率稳定性良好。另外, 还在中国原子能科学研究院的 CARR 反应堆 (China Advanced Research Reactor) 上进行了中子束流实验, 通过狭缝测量到探测器位置分辨率为  $(3.01\pm 0.03)\text{ mm}(\text{FWHM})$ , 已经接近高压  $^3\text{He}$  MWPC 中子探测器水平。

**关键词:** 热中子探测; GEM; THGEM; nTHGEM

**中图分类号:** TL816<sup>+</sup>.3    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.02.172

### 1 引言

中子具有不带电荷、有磁矩、可区分同位素等特点, 在研究微观物质的结构方面具有很大的优势, 使其成为新材料研发以及科学研究的重要手段之一。CSNS (China Spallation Neutron Source) 是新一代的加速器脉冲中子源, 计划 2018 年建成使用, 成为继美国 SNS、英国 ISIS 及日本 JSNS 之后的全球第四大散裂中子源, 其脉冲中子通量将可达到  $2.4\times 10^{16}\text{ n/cm}^2/\text{s}$ <sup>[1, 2]</sup>。传统的  $^3\text{He}$  探测器无法满足高通量下的热中子探测要求, 且近年来全球  $^3\text{He}$  气体的供应严重短缺, 因此研制取代  $^3\text{He}$  探测技术的新型先进热中子探测器成为迫切需求<sup>[3]</sup>。

基于 GEM(Gaseous Electron Multiplier) 的微结构气体探测器 (MPGD)<sup>[4]</sup>, 由于其良好的空间分辨 ( $<200\ \mu\text{m}$ )、时间分辨 ( $<10\ \text{ns}$ )、高计数率能力 ( $\sim 10$

$\text{MHz/cm}^2$ )、强 n- $\gamma$  甄别能力以及可大面积制作 ( $\text{m}^2$ ) 等特点, 被广泛应用在 高能物理探测领域<sup>[5-11]</sup>。尽管 GEM 主要用于探测带电粒子, 但通过在阴极或 GEM 表面涂上特定的转换材料, 即可实现对中子的探测。 $^{10}\text{B}$  的中子散射截面大, 且与中子发生反应后释放出的  $\gamma$  射线能量相较于  $^6\text{Li}$ ,  $^{113}\text{Gd}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$  低很多, 对 n- $\gamma$  甄别影响较小, 是理想的中子转换材料<sup>[12]</sup>。基于以上原因, 涂硼的 GEM 热中子探测器作为替代  $^3\text{He}$  探测器的理想候选应运而生, 其在 2000 年前后由德国的 Martin Klein 教授提出, 并于 2006 年使用 CERN 标准的 GEM 设计了第一台涂硼的 GEM 热中子探测器<sup>[13]</sup>。近年来 GEM 探测技术在国内蓬勃发展<sup>[14-18]</sup>, 并在 CERN 标准的 GEM 基础上采用印刷电路板制造技术 (PCB) 设计生产出了 THGEM(THick GEM)。THGEM 具有和 GEM 相似的时间分辨 ( $<10\ \text{ns}$ )、计数率能力 ( $\sim 10\ \text{MHz/cm}^2$ ) 及较好的空间分辨

收稿日期: 2018-01-01; 修改日期: 2018-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0403702); 国家自然科学基金资助项目 (11635012, 11775243); 博士后创新人才支持计划 (1IBX20170024545); 广东省自然科学基金项目 (2017A030313027); 中国科学院科研装备研制项目 (YZ201512)

作者简介: 鲁黎明(1991-), 男, 湖南岳阳人, 在读硕士, 从事核科学与技术研究; E-mail: luliming@ihep.ac.cn

† 通信作者: 郑波, E-mail: zhengbo\_usc@163.com; 孙志嘉, E-mail: sunzj@ihep.ac.cn.

(<1 mm)。同时, 相比 GEM 有着更大的孔直径、孔间距和厚度, 且更加坚固、便宜, 易于生产。本文使用的 nTHGEM 由中国科学院高能物理研究所 (IHEP) 谢宇广老师课题组提供, 与普通 THGEM 由环氧树脂材料 FR-4 作为基材不同, nTHGEM 采用陶瓷基材<sup>[17, 19]</sup>。本研究使用了一种改良版的陶瓷基材, 由 90% 的纯陶瓷和 10% 的玻璃纤维混合而成。如表 1 所列, 这种陶瓷基材主要组成元素为 neutron cross section 很小的氧 (约占 48.5%), 基本不含氢 (neutron cross section 大), 对 neutron scattering 影响小, 此外该基材还具有较少的放气性以及低本底辐射的优点, 因此基于该基材制作的 nTHGEM 探测器更加适合于 neutron beam 的监测。

nTHGEM 为三层结构, 总厚度为 200  $\mu\text{m}$ , 中间层为厚 170  $\mu\text{m}$  的陶瓷基材, 陶瓷基材上下表面各覆有 15  $\mu\text{m}$  厚的 Cu-Au 合金, 其最小组成单元的结构如图 1(a)。nTHGEM 的灵敏面积为 50 mm $\times$ 50 mm, 上

表 1 陶瓷基材主要组成元素

元素	质量分数	中子截面/b
O	0.485	0.000 28
Si	0.343	0.166
Al	0.008	0.233
Fe	0.020	2.56
Mg	0.001	0.063
Ca	0.002	0.43
Na	0.024	0.53
K	0.045	0.001 8

面规则排列着 8 540 个通过标准 PCB 钻孔及蚀刻工艺得到的膜孔, 孔直径 200  $\mu\text{m}$ , 孔间距 600  $\mu\text{m}$ , 孔边缘 80  $\mu\text{m}$ , 任意 3 个相邻膜孔的中心点连线为边长 600  $\mu\text{m}$  的等边三角形。图 1(b) 为 nTHGEM 实物图。当在 nTHGEM 上下表面加不同电压时, 膜孔中可以产生极高的电场强度, 使电子倍增<sup>[20]</sup>。

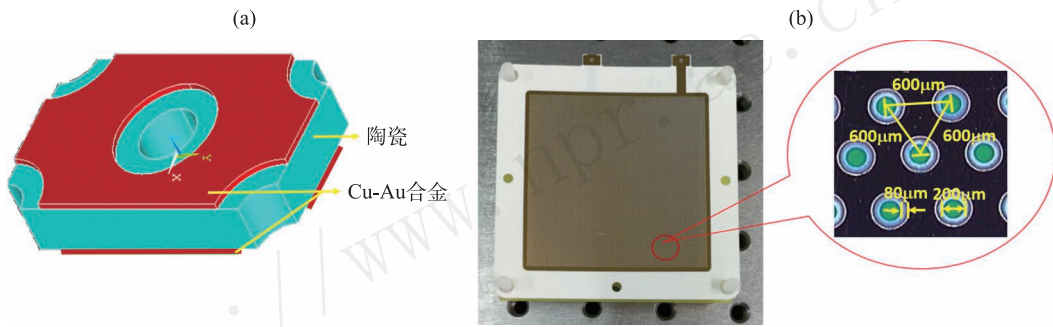


图 1 (在线彩图) nTHGEM 探测器结构图 (a) nTHGEM 最小结构单元; (b) nTHGEM 实物。

## 2 nTHGEM 探测器 <sup>55</sup>Fe 放射源测试

### 2.1 实验装置及工作原理

nTHGEM 探测器气室结构如图 2(a) 所示, 主要由漂移极 (阴极, 涂硼铝膜), 收集极 (阳极, 铜板), 以及分布有 8 540 个膜孔的单层的 nTHGEM 组成, 其中漂移极到 nTHGEM 上表面之间的漂移区间隙  $D_d$  为 3 mm, nTHGEM 下表面到收集极之间的收集区间隙  $D_i$  为 2 mm。实验使用放射性活度为 1 mCi 的 <sup>55</sup>Fe X 射线源, 常压下的 Ar/CO<sub>2</sub> 混合气体作为工作气体, 在整个实验过程中, 气室内的工作气体处在流气状态, 以避免老化效应, 从而保证探测器的长期稳定性。探测器高压由 CAEN Mod.N470 高压插件提供, 电子学系统使用 Ortec 415 脉冲发生器及标准电容器 (1.54 pf) 校准。 <sup>55</sup>Fe 的 X 射线能量为 5.9 keV<sup>[21]</sup>。实验中将 <sup>55</sup>Fe 源置于探测器入射窗, 由 <sup>55</sup>Fe 产生的 X 射线经过入射窗进入漂移区, 与工作气体发生电离作用, 将能量沉积

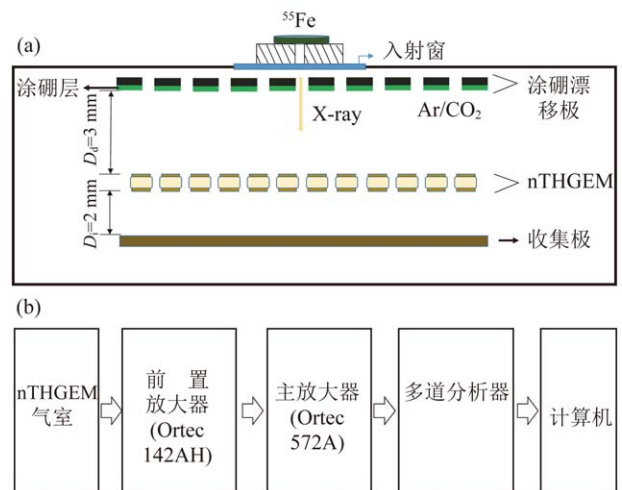


图 2 (在线彩图) nTHGEM 探测器气室及测试流程图 (a) nTHGEM 气室结构; (b) 测试装置流程图。

在气室内, 同时产生原初电子, 原初电子在漂移电场  $E_d$  的作用下到达 nTHGEM, 并在 nTHGEM 膜孔内的强

电场作用下发生雪崩效应,使得原初电子倍增,倍增后的电子在收集电场  $E_i$  作用下进入收集区,并在向收集极漂移的过程中形成初始信号,初始信号经过前置放大器 (Ortec142AH) 和主放大器 (Ortec572A) 放大后输入多道分析器 (trump-usb-8k),最后在计算机上得到信号能谱图。

## 2.2 计数率坪曲线

nTHGEM 探测器必须在工作电压区间内工作,当输入电压低于工作电压时,探测器无法正常工作,而输入电压高于工作电压时,nTHGEM 探测器会因为电压过高而产生打火,最终导致 nTHGEM 探测器被击穿而损坏。nTHGEM 探测器在不同气体及场强下的工作电压区间通过测量该条件下 nTHGEM 探测器的计数率坪曲线来确定,本测试实验研究了 nTHGEM 探测器

在 Ar (90%)+CO<sub>2</sub> (10%), Ar (80%)+CO<sub>2</sub> (20%), Ar (70%)+CO<sub>2</sub> (30%) 3 种 Ar/CO<sub>2</sub> 比份工作气体中、不同场强下的计数率坪曲线。实验过程中气室内气体流速保持在 30 ml/min, nTHGEM 膜间压  $V_n$  步长为 10 V,取数时间为 30 s,当 nTHGEM 探测器发生打火放电时,关闭探测器高压电源。

如图 3(a) 所示,在不同 Ar/CO<sub>2</sub> 混合气体比份中,相同场强下,CO<sub>2</sub> 比例越低, nTHGEM 探测器达到相同的计数率所需要的工作电压越小。如图 3(b),在相同 Ar/CO<sub>2</sub> 混合气体比份中,  $E_i$  增大时,计数率坪曲线向左移动,在一定范围内,收集场强越大时, nTHGEM 探测器达到相同的计数率所需要的工作电压越小。当探测器工作条件为 Ar (90%)+CO<sub>2</sub> (10%),  $E_d=1$  kV/cm,  $E_i=2.5$  kV/cm 时,其计数率坪区间所对应的工作电压为 860 V 到 1000 V。

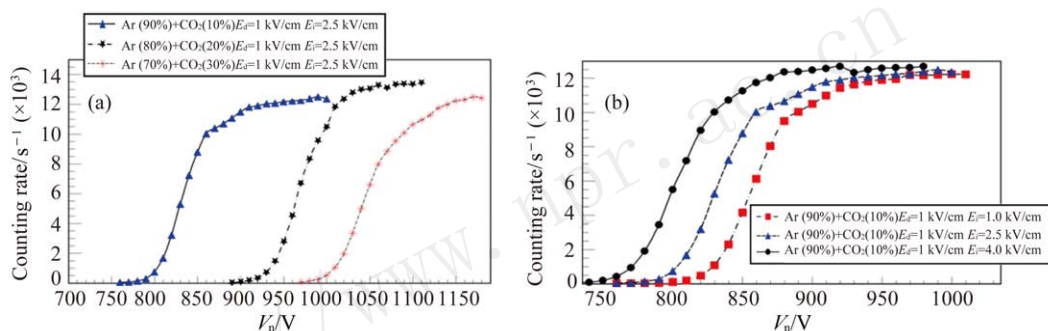


图 3 (在线彩图) nTHGEM 探测器计数率变化曲线  
(a) 不同 Ar/CO<sub>2</sub> 比份下计数率变化曲线; (b) 相同 Ar/CO<sub>2</sub> 比份下计数率变化曲线。

## 2.3 增益

增益是评价微结构气体探测器 (MPGDs) 优劣的一项重要指标,本文对单层 nTHGEM 探测器的增益范围、场强对增益的影响及增益的稳定性进行了较为细致的研究。实验使用 <sup>55</sup>Fe X 射线放射源,在 Ar(90%)+CO<sub>2</sub>(10%), Ar(80%)+CO<sub>2</sub>(20%), Ar (70%)+CO<sub>2</sub>(30%) 3 种工作气体环境中,不同场强下,对 nTHGEM 探测器的增益性能进行了研究。实验过程中探测器气体流速保持在 30 mL/min, nTHGEM 膜间压  $V_n$  步长为 10 V,取数时间为 30 s,当 nTHGEM 探测器发生打火放电时,关闭探测器高压电源。

如图 4 所示,在 Ar (90%)+CO<sub>2</sub> (10%) 工作气体中单层 nTHGEM 探测器增益范围为 300 至 3000,不同 Ar/CO<sub>2</sub> 比份下,增益随着 CO<sub>2</sub> 比例的增加而减小;相同 Ar/CO<sub>2</sub> 比份下,增益随 nTHGEM 探测器的工作电压和  $E_i$  的增大而增大。对于涂硼中子探测,中子通过转化材料 <sup>10</sup>B 产生 <sup>7</sup>Li 和  $\alpha$  离子<sup>[22]</sup>, <sup>7</sup>Li 和  $\alpha$  离子在

探测器工作气体中沉积的能量比光子要高几个量级,电离产生的原初电子数量更多, nTHGEM 探测器的有效增益不需要太高,就能够达到中子探测的要求,  $10^3$  量级的增益完全满足中子探测的需求,因此我们认为,作为有别于传统 FR-4 基材的新型陶瓷基材 nTHGEM 探测器的性能已经十分出色。

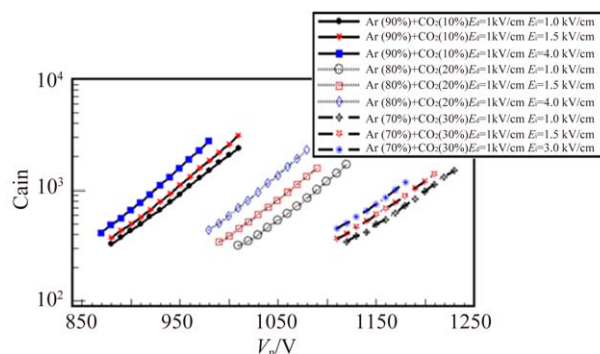


图 4 (在线彩图) nTHGEM 探测器增益变化曲线

## 2.4 能量分辨率

能量分辨率的高低直接关系到微结构气体探测器



的性能, 其取决于 nTHGEM 探测测量  $^{55}\text{Fe}$  在氩气为基底的工作气体中的能谱图是测量 nTHGEM 探测器能量分辨率的一个简单有效的办法。能量为 5.9 keV 的  $^{55}\text{Fe}$  X 射线在以氩气为基底的工作气体中能产生峰值为 5.76 keV 的全能峰, 同时产生峰值为 2.9 keV 的逃逸峰, 因此在  $^{55}\text{Fe}$  能谱图中应该有两个峰, 且逃逸峰所在位置约为全能峰所处位置的一半<sup>[25]</sup>。实验使用  $^{55}\text{Fe}$  X 射线放射源, 在 Ar (90%)+ CO<sub>2</sub> (10%) 工作气体,  $E_d=1$  kV/cm,  $E_i=3$  kV/cm,  $V_n=990$  V 的测试条件下得到了 nTHGEM 探测器  $^{55}\text{Fe}$  能谱图(图 5)。对图 5 中的能谱图进行高斯拟合, 并通过计算得到 nTHGEM 探测器能量分辨率为 31%。

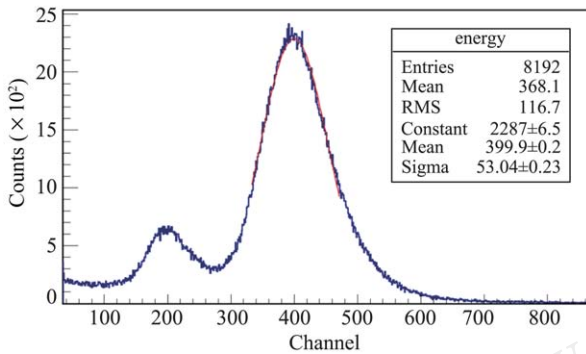


图 5 (在线彩图) nTHGEM 探测器  $^{55}\text{Fe}$  能谱图 (能量分辨率 31%)

为了研究 nTHGEM 探测器能量分辨率随场强及膜间压的变化规律, 测量了探测器在 Ar(90%)+CO<sub>2</sub>(10%) 工作气体中,  $E_d=1$  kV/cm,  $E_i=1.0$  kV/cm, 1.5 kV/cm, 3.0 kV/cm, 4.0 kV/cm 4 种场强下, 不同 nTHGEM 膜间压下的能谱图, 计算得到各点的能量分辨率, 结果如图 6 所示。从图中可知, 能量分辨率随  $E_i$  及  $V_n$  的增大而变好, 且在 Ar (90%)+CO<sub>2</sub> (10%) 工作气体中, 当  $E_d=1$  kV/cm,  $E_i=3.0$  kV/cm,  $V_n=990$  V 时, nTHGEM 探测器能量分辨率达到 31%, 在氩气和异丁烷混合气体下, 探测器能量分辨率最高能达到 24%<sup>[19]</sup>, 对于中子探测器, 考虑到应用环境的安全性, 工作气体优先选择氩气和二氧化碳混合气体。THGEM 的优势是高计数率, 本身能量分辨即电荷分辨差 (~30%), 因此在设计探测器电子学的时候, 利用二维信号符合的数字方法, 只要 X 和 Y 方向同时有信号即判断为有效中子信号, 对应的坐标即中子的位置, 这种方法只需要判断信号是否过阈值, 而不需要测量探测器的输出电荷, 从而大大降低对探测器本身能量(电荷)分辨的要求, 同时还能提高电子学的读出速度, 能更好的匹配 nTHGEM 探测器高计数率这一特点。我们

通过读出电子学方案有效规避了 nTHGEM 探测器本身能量(电荷)分辨率差(相对其它探测器)这一缺点, 但它仍然是反映 nTHGEM 探测器性能的重要指标, 能量分辨率约 30% 能够满足中子探测的需求。

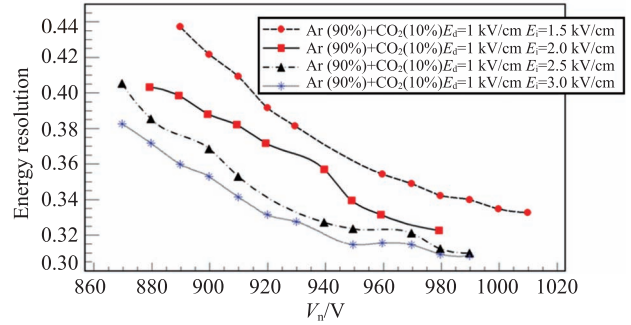


图 6 (在线彩图) nTHGEM 探测器能量分辨率变化曲线

## 2.5 稳定性

计数率稳定性是 nTHGEM 探测器工程应用中的一个关键指标。为了提高读出电子学的计数率, nTHGEM 探测器的读出电子学方案采用二维信号符合的方法来确定中子击中的位置, 相较于电荷重心法, 二维信号符合的方法不需要测量电荷, 只要二维读出的信号同时过阈就能获得中子的位置信息, 因此对于探测器的稳定性, 只要求探测器在一定阈值情况下具有很好的计数率稳定性, 而不需要探测器具有很高的增益稳定性, 从而有效避开气体探测器这一劣势。nTHGEM 的基材、孔边缘尺寸、膜孔及膜表面覆铜的质量等因素都会影响 nTHGEM 探测器的稳定性<sup>[24]</sup>。为了探究单层 nTHGEM 探测器的增益及计数率稳定性, 用  $^{55}\text{Fe}$  作为 X 射线放射源, 同时在  $^{55}\text{Fe}$  源下方放置一个孔径为 2 mm, 厚度为 1 cm 的准直器, 提高 X 射线的准直度, Ar (90%)+CO<sub>2</sub>(10%) 为工作气体, 整个测试过程中保持流气状态, 气体通量为 30 mL/min, 探测器测试膜间压为 980 V,  $E_d=1$  kV/cm,  $E_i=2.5$  kV/cm, 连续测量 40 h, 每隔 10 分钟取数一次。图 7(a) 所示的是 nTHGEM 探测器增益稳定性, 可以看到增益随时间会有一些缓慢变化波动, 这些缓慢变化和波动应该主要是由于温度、气压和其他一些环境的变化引起的。即便如此, 在整个测试过程中, nTHGEM 探测器增益基本维持在  $10^3$  以上。图 7(b) 为探测器计数率稳定性曲线, 可见在整个测试过程中, 探测器的计数率波动非常小, 增益的波动对计数率没有明显影响, 通过统计数据分析 40 h 计数率, 定义计数率波动等于标准方差与测量平均值的比值, 得到 40 h 探测器计数率波动小于 1%, 完全满足未来探测器工程应用的需求。

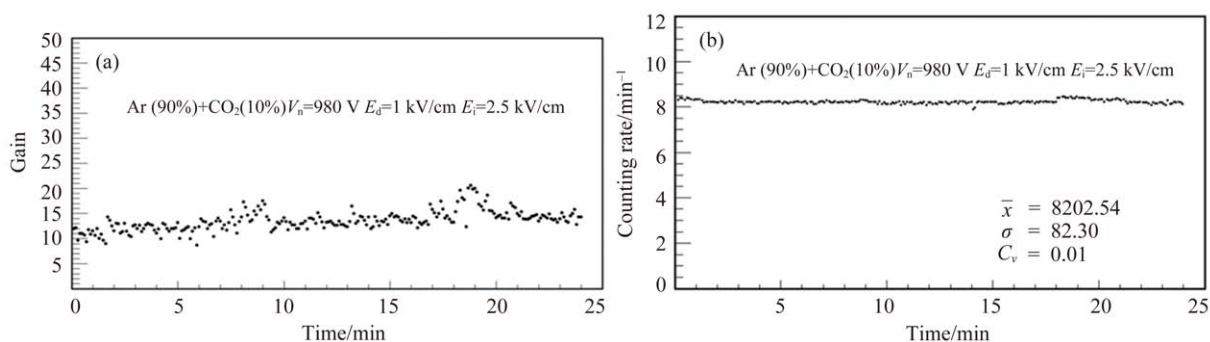


图 7 nTHGEM 探测器稳定性曲线  
(a) nTHGEM 探测器增益稳定性曲线; (b) nTHGEM 探测器计数率稳定性曲线。

### 3 中子束流实验

为了检测工艺更新后的 nTHGEM 探测器性能，在中国原子能科学研究院的先进研究堆 (CARR) 的反射谱仪上对探测器进行了二维成像测试。CARR 是一座高性能、多用途研究堆，由中核集团中国原子能研究院自主研发、设计、建造，功率为 60 MW，最高热中子注量率达到  $1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ，在同类研究堆中主要技术指标位居世界前列、亚洲第一<sup>[23]</sup>。将 nTHGEM 探测器安装到之前研制的一台二维读出探测器样机内，采用  $2 \mu\text{m}$  厚涂硼漂移极作为中子转换层，单层 nTHGEM 作

为气体放大，信号由二维读出条读出 ( $X$  方向 32 路 +  $Y$  方向 32 路)，条周期 1.56 mm，读出电子学模拟部分采用 ASIC 芯片，数字化部分主要是基于高速的 FPGA 来实现逻辑运算，使用二维信号符合法实现二维位置的定位<sup>[18]</sup>。为了测试探测器的二维成像能力，在 1 mm 厚 49 mm  $\times$  49 mm 的 Cd 片上开 CIAE 字 (笔画宽 1 mm) 进行成像，扣除相同条件下杂散中子和本底，测量时间为 300 s，图 8 为 CIAE 成像，结果表明探测器能清晰显示字体的轮廓，具有很好的中子成像功能。

同时，为了准确测量探测器的位置分辨，在探测器

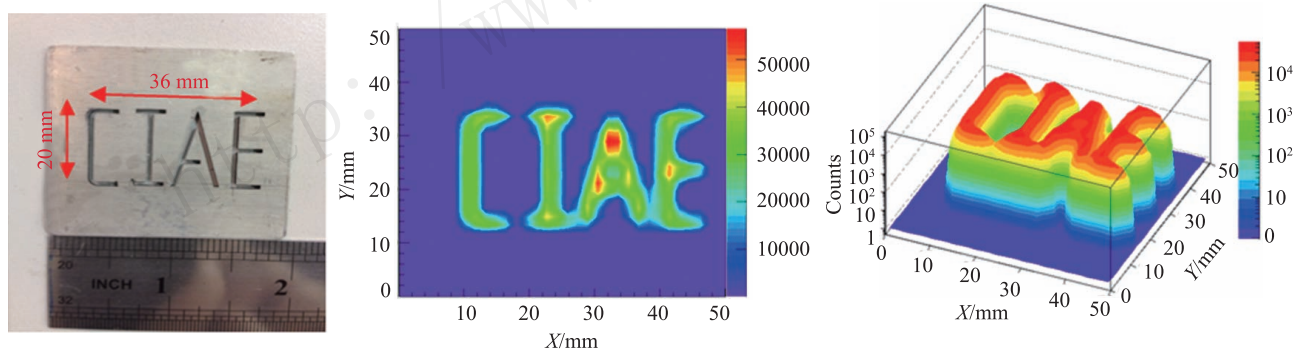


图 8 (在线彩图) nTHGEM 探测器的二维成像

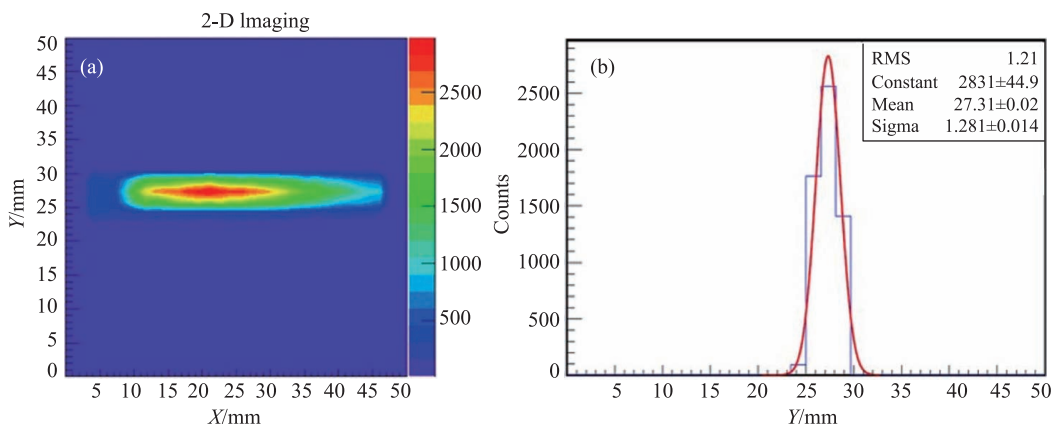


图 9 (在线彩图) nTHGEM 探测器的位置分辨

正前方放置一块 2 mm 厚尺寸为 49 mm×49 mm 的铝板, 中心沿水平方向( $X$  方向)开有一条宽 0.5 mm 的狭缝, 调整探测器位置使得中子束流对准狭缝, 开启探测器测量 5 min, 同样扣除相同条件下杂散中子和本底, 获得透过狭缝的中子二维成像(图 9(a)), 为了获得探测器中心位置处的位置分辨率, 从二维成像图中取  $X$  方向中心点对应沿  $Y$  方向的位置谱(图 9(b)), 对峰位进行高斯拟合, 从而得到探测器中心处的位置分辨率为  $(3.01\pm 0.03)$  mm(FWHM), 该结果已经接近高压  $^3\text{He}$  MWPC 中子探测器位置分辨率 2 mm 的水平。

#### 4 总结

本文使用  $^{55}\text{Fe}$  X 射线放射源, 在氩基混合气体中, 对新型陶瓷 nTHGEM 探测器的各项性能进行了较为仔细的研究。单层 nTHGEM 探测器在 Ar/CO<sub>2</sub> 混合气体中的有效增益最高达到  $3\times 10^3$ 。在 Ar (90%)+CO<sub>2</sub>(10%) 混合气体中计数率坪曲线区间平均为 150 V, 具有较宽的工作电压坪区, 在长达 40 h 的稳定性测试中, 计数率波动小于 1%。在 CARR 反应堆中子束流实验中, 通过狭缝对探测器进行成像和位置分辨率测量, 结果表明探测器具有良好的二维成像能力, 探测器中心处位置分辨率为  $(3.01\pm 0.03)$  mm(FWHM)。本工作为后续进一步优化 nTHGEM 探测器设计和工艺奠定了基础, 更加详细的中子束流实验结果将陆续发表。

**致谢** 感谢中国原子能科学研究院 CARR 堆提供宝贵的束流实验时间。

#### 参考文献:

- [1] WANG Fangwei, YAN Qiwei, LIANG Tianjiao, *et al.* *Physics*, 2005, **34**(10): 731. (in Chinese)  
(王芳卫, 严启伟, 梁天骄, 等. *物理*, 2005, **34**(10): 731.)
- [2] WANG Fangwei, LIANG Tianjiao, YIN Wen, *et al.* *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2013, **56**(12): 2410.
- [3] SHEA D A, MORGAN D. The Helium-3 Shortage: Supply, Demand, and Options for Congress[R]. Congressional Research Service, 2010.
- [4] SAULI F. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 1997, **386**(2): 531.
- [5] KLEIN M, SCHMIDT C J. *Nucl Instr & Meth A*, 2011, **628**(1): 9-18.
- [6] YU J, BALDELOMAR E, PARK K, *et al.* *Physics Procedia*, 2012, **37**(12): 591.
- [7] CROCI G, CAZZANIGA C, ALBANI G, *et al.* *Physics Procedia*, 2015, **62**: 118.
- [8] OHSHITA H, UNO S, OTOMO T, *et al.* *Nucl Instrs & Meth A*, 2010, **623**(1): 126.
- [9] MURARO A, CROCI G, ALBANI G, *et al.* *Nucl Instrs & Meth A*, 2016, **813**(C): 147.
- [10] CHECHIK R, CORTESI M, BRESKIN A, *et al.* Thick GEM-like (THGEM) Detectors and Their Possible Applications[R]. SNIC Symposium, 2006.
- [11] DAS S K, MIZOI Y, UKUDA T, *et al.* *Nucl Instrs & Meth A*, 2011, **625**(1): 39.
- [12] LI K, ZHOU J R, WANG X D, *et al.* *Chinese Physics C*, 2016, **40** (7): 100.
- [13] CHRISTIAN J. SCHMID T, MARTIN K. *Neutron News*, 2006, **17**(1): 12.
- [14] LIU H B, ZHENG Y H, XIE Y G, *et al.* *Nucl Instrs & Meth A*, 2011, **659**(1): 237.
- [15] ZHANG A W, YU B X, XIE Y G, *et al.* *Chinese Physical C*, 2012, **36** (2): 142.
- [16] AN Z H, LV J G, WANG Z G, *et al.* *Chinese Physical C*, 2010, **34** (1): 83.
- [17] ZHANG X, NIU S, XIE Y, *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2015, **10**(10): P10043.
- [18] YANG L, ZHOU J R, SUN Z J, *et al.* *Chinese Physics C*, 2015, **39** (5): 64.
- [19] YAN J Q, XIE Y G, HU T, *et al.* *Chinese Physics C*, 2015, **39** (6): 64.
- [20] WANG Y F, SUN Z J, ZHOU J R, *et al.* *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2013, **56**(10): 1897.
- [21] HE Z Y, ZHOU J R, SUN Z J, *et al.* *Chinese Physics C*, 2014, **38**(5): 58.
- [22] ZHOU J R, SUN Z J, LIU B, *et al.* *Chinese Physics C*, 2011, **35** (7): 668.
- [23] KE Guotu, WANG Yulin, JIN Huajin. *Science and Technology Achievements Management and Research*, 2014 (4): 25. (in Chinese)  
(柯国土, 王玉林, 金华晋. *科技成果管理与研究*, 2014(4): 25.)
- [24] BRESKIN A, ALON R, CORTESI M, *et al.* *Nucl Instr & Meth A*, 2008, **598**(1): 107.
- [25] LIU Hongbang. An Optimized Thickness Thick Gas Electron Multiplier Development and Performance Research and Application[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)  
(刘宏邦. 一种优化厚度的厚型气体电子倍增器的研制与性能研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.)

## Performance Study of nTHGEM Detector for Thermal Neutron

LU Liming<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Xiaojuan<sup>2,3</sup>, ZHOU Jianrong<sup>2,3</sup>, JIANG Xingfen<sup>2,3</sup>, ZHU Lin<sup>1,2,3</sup>, HE Cong<sup>1,2,3</sup>,  
TAN Yingying<sup>1,2,3</sup>, YANG Guian<sup>2,3</sup>, XIA Yuanguang<sup>2,3</sup>, XIE Yuguang<sup>2,3,4</sup>, ZHENG Bo<sup>1,†</sup>,  
WANG Xiaodong<sup>1</sup>, CHEN Yuanbai<sup>2,3,4</sup>, SUN Zhijia<sup>2,3,4,†</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;

2. Dongguan neutron science center, Dongguan 523803, Guangdong, China;

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

4. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the development of pulsed intense neutron source, the high-performance neutron detector poses more challenges. The severe shortage of  $^3\text{He}$  gas resources and the urgent need of neutron detector with high counting rate have begun to restrict the neutron source application technology development. In response to the particularity of neutrons, the Institute of High Energy Physics of CAS developed a nTHGEM(neutron Thick Gaseous Electron Multiplier)of ceramic substrate for neutron detection. The neutron detector based on nTHGEM is one of the most important directions for the development of alternative  $^3\text{He}$  detection technology in the world at present because of its high counting rate, high position and time resolution, large gain, simple fabrication process and large area production. In order to study the properties of nTHGEM detector in detail, this paper studied the relationship between nTHGEM detector's gain, counting rate stability, energy resolution and other key parameters and nTHGEM film voltage, collection field strength and drift field strength using  $^{55}\text{Fe}$  radioactive source, Optimized the working parameters of nTHGEM detector in different working gases, which laid the foundation for further optimization of nTHGEM detector design and process. The experimental results show that the single-layer nTHGEM detector has a gain of  $10^3$  in a Ar(90%)+CO<sub>2</sub>(10%) mixed gas with good counting rate stability. In addition, a neutron beam experiment was performed on the China Advanced Research Reactor at the China Institute of Atomic Energy, and the position resolution of the detector was  $(3.01\pm 0.03)$  mm (FWHM) measured by slits. Its performance is close to the high pressure  $^3\text{He}$  MWPC neutron detector level.

**Key words:** thermal neutron detection; GEM; THGEM; nTHGEM

**Received date:** 1 Jan. 2018; **Revised date:** 5 Mar. 2018

**Foundation item:** National Key Research and Development Program (2017YFA0403702); National Natural Science Foundation of China (11635012,11775243); Post Doctoral Innovative Talent Support Program (1IBX20170024545); Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2017A030313027); Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (YZ201512)

† **Corresponding author:** ZHENG BO, E-mail: [zhengbo\\_usc@163.com](mailto:zhengbo_usc@163.com); SUN Zhijia, E-mail: [sunj@ihep.ac.cn](mailto:sunj@ihep.ac.cn).