

文章编号: 1007-4627(2018)01-0061-05

THGEM 探测器 X 光斑寻迹和位置分辨实验研究

刘川凤^{1,2,3}, 周晓娟^{1,3}, 周健荣^{1,3}, 鲁黎明^{1,3,5}, 朱林^{1,3,5}, 何聪^{1,3,5}, 谭莹莹^{1,3,5}, 许虹^{1,3},
谢宇广^{1,4}, 王晓冬⁵, 吴金杰⁶, 陈元柏^{1,3,4}, 孙志嘉^{1,3,4,†}

- (1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
2. 东莞材料基因高等理工研究院, 广东 东莞 523803;
3. 东莞中子科学中心, 广东 东莞 523803;
4. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;
5. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421000;
6. 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 介绍了一种基于 THGEM 的 X 射线光斑寻迹探测器, 用于 X 射线单光子计量技术研究和测量, 探测器有效面积 200 mm×200 mm, 采用 128 路基于 ASIC 和 FPGA 的高速读出电子学, 探测器分为中间高分辨区和外围低分辨区两部分, 两部分共用一套读出电子学。实验在中国计量科学研究院利用 X 光机产生的束线, 测试光斑位置、光斑精细分布以及探测器的位置分辨。实验结果表明, 探测器实现了同时对光斑寻迹和光斑的精细测量, 探测器中间高分辨区 x 方向的位置分辨率为 0.63 mm(FWHM), y 方向位置分辨率为 0.62 mm(FWHM), 探测器各项性能指标均达到了预期目标。

关键词: THGEM 探测器; 位置分辨; 光斑精细测量; 光斑寻迹

中图分类号: O572.21⁺2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.01.061

1 引言

GEM(Gas Electron Multiplier) 是 Fabio Sauli 于 1997 年发明的一种新型的微结构气体探测器^[1]。探测器具有较高的位置、时间、能量分辨率, 在较低的电压下能获得高的增益, 价格低廉, 可大面积制作^[2]。GEM 探测器可以应用到很多方面: 粒子物理与核物理探测^[3]、宇宙学的双相暗物质探测^[4]、辐射成像等。在我国“十一五”重点建设的大科学装置中国散裂中子源已经使用 GEM 探测器作为束流监测器^[5, 6]。标准的 GEM 是由中间为 50 μm 厚的 kapton 膜, 上下表面各覆 5 μm 厚的金属铜, 表面均匀分布的双倒锥形圆孔构成。随着印刷电路板钻孔技术的发展 Chechik 等^[7]在 GEM 结构的基础上将双倒锥形孔改成圆柱形孔, 形成了 THGEM, 基材采用 G10, 一种由玻璃纤维和环氧树脂碾压而成的吸附材料, 膜厚度为 0.4~3 mm, 孔径为 0.3~1 mm, 孔间距为 0.7~7 mm, GEM 膜的上下表面覆盖的铜层分布的圆孔和中间的基材圆孔边缘有一定的 rim 尺寸。本实验使用的 THGEM 膜由中国科学

院高能物理研究所自主研发, 采用国内 PCB 制板工艺技术制作, 厚度和孔径为 0.2 mm, 孔间距 0.6 mm。

为了满足中国计量科学研究院对 X 射线单光子在减少探测器读出电子学路数, 降低成本条件下的探测要求, 实现 X 射线光斑寻迹和探测器中心区域的空间分辨率小于 0.8 mm 的目标, 专门设计了该探测器, 探测器有效面积为 200 mm×200 mm, 分为高分辨和低分辨两个区域: 中间区域像素大小为 0.68 mm, 外围区域像素大小为 3.125 mm, 两个区域同时共用同一套读出系统, 节省了读出电子学, 满足 X 射线光斑寻迹对大面积探测的需求, 同时可利用中间高分辨区域对 X 射线光斑进行精细测量, 实现一台探测器两种应用功能。

2 探测器结构及测试条件

2.1 探测器结构

THGEM 探测器可分为漂移电极、THGEM 膜、读出电极及后续电子学四部分。漂移电极和膜的上表面构成漂移区, 间距为 6 mm, 膜的下表面和读出电极之间

收稿日期: 2017-11-27; 修改日期: 2018-01-19

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); 广东省引进创新创业团队资助项目(2016ZT06G025); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201512)

作者简介: 刘川凤(1990-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事气体探测器研究; chuanfeng_liu@163.com

† 通信作者: 孙志嘉, E-mail: sunjz@ihep.ac.cn。

构成收集区, 间距为 3 mm。入射 X 射线经过入射窗, 进入探测器内部, X 射线和气体发生相互作用, 产生的电子在漂移区电场作用下运动, 进入膜孔, 由于膜的上下表面存在电压差, 膜孔内的电场强度达到 25 kV/cm, 电子发生雪崩效应, 电子个数为 $10^3 \sim 10^4$ 数量级, 继而在收集区的电场作用下向读出电极的方向运动, 从而在读出电极上产生感应信号, 经二维读出电子学读出, 从而获得入射 X 射线的位置信息。

探测器高压通过电阻链分压, 经 RC 滤波电路去除纹波干扰后为探测器 3 个电极提供工作高压, 漂移区分压电阻为 5 M Ω , THGEM 膜分压电阻为 10 M Ω , 收集区分压电阻为 7.5 M Ω , 总电阻为 22.5 M Ω 。在实验过程中, 读出电极对地进行信号读出, 漂移电极和 THGEM 膜加负高压, 探测器可采用经济的氩基工作气体, 主要有 Ar/CO₂ 和 Ar/iC₄H₁₀ 两种混合气体, 工作在常压流气式模式。探测器结构图如图 1 所示, 图 1(a) 是探测器结构示意图, 图 1(b) 是探测器实物图。

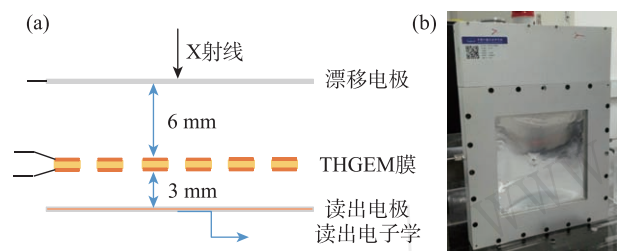


图 1 (在线彩图) 探测器结构示意图 (a) 及实物图 (b)

2.2 读出电路板设计

为了实现大面积寻找光斑位置和小面积对光束精细结构成像的功能, 电路板的设计由中间高灵敏区和外围的低灵敏区两部分组成, 中心高分辨率区域面积为 43.3 mm \times 43.3 mm, 外围低分辨率区覆盖整个探测器面积 200 mm \times 200 mm, 读出电极的高密度电极和低密度电极都是由 64 行和 64 列组成。高密度电极和四周的低密度电极采用同一行或者同一列的读出电极直接相连的方式, 并且共用一套电子学, 如图 2 所示。

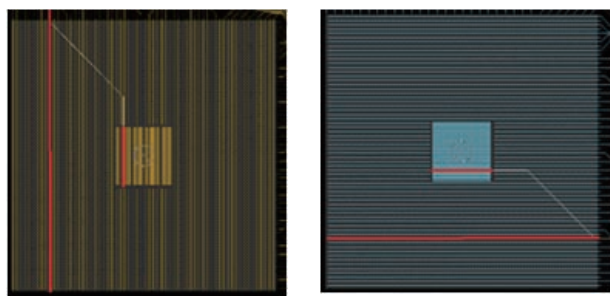


图 2 (在线彩图) 读出电路板电极连接方式

探测器读出电路板采用一种特殊的读出条(图 3), 并非传统的条结构^[8], 而是采用三角形 pad 设计, 处于同一行的相同的右上角的三角形 pad 通过 PCB 板层间走线连通形成 y 方向读出条, 相同列的左下角三角形 pad 通过 PCB 板层间走线连通形成 x 方向读出条, 不同方向信号处于不同层, 每一层之间设置全覆盖地屏蔽层, 从而有效避免信号之间的串扰。相比传统的条读出结构, 三角形 pad 读出结构使得 x 方向和 y 方向读出条结构完全对称和均匀, 这样在高分辨区域内, x 方向和 y 方向的分辨能力是完全一致的。目前该探测器中心区域的读出条周期(三角形直角边长)0.68 mm 已接近国内 PCB 制板工艺的极限。

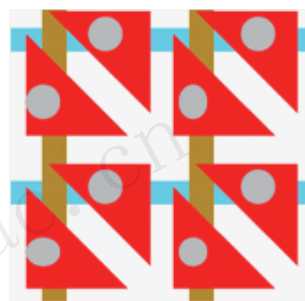


图 3 (在线彩图) 二维读出板三角 pad 示意图

2.3 读出电子学系统

读出电子学系统作为探测器重要组成部分, 对探测器输出的信号进行放大和处理, 最终获得粒子击中的位置和时间信息。确定粒子击中的二维位置有 2 种方式: 一种通过计算电荷的重心确定粒子电离位置; 另一种是采用二维读出条符合的方法来确定粒子电离位置。二者都是采用二维读出条的结构进行读出, 所需电子学路数也相同, 重心法通过测量信号的电荷进行定位, 精度高但处理速度慢, 因此计数率低。二维信号符合的方法不需要读取电荷信息, 采用数字化读出, 计数率更高, 读取速度快, 但与重心法相比, 相同的电子学通道时, 位置分辨较差一些。对于 X 光束线测量, 通量和计数率高, 因此选择二维信号符合的方法进行快速读出和测量, 可以有效减少多次击中的无效事例和降低信号的堆积^[9]。

读出电子学采用 2 块 64 路 CIPix ASIC 芯片, 每一个芯片集成了 64 路通道的低噪声电荷灵敏前置放大器, 以及成形器和甄别器, 对 x , y 方向信号起到放大、整形和甄别的作用。GEM 探测器读出电子学采用自触发无外部触发信号, 当 X 方向和 Y 方向同时(符合时间为 400 ns)有过阈信号时, 该信号被认为是有效事例, 再经 FPGA 进行逻辑运算和处理, 粒子击中时一般会有 2~3 个相邻读出 pad 响应, 通过信号符合, 只有当

相邻的 x 轴和 y 轴均有过阈信号时, 判断为有效击中事例, 取中间条为粒子击中的位置, 最后将粒子击中的位置与时间信息通过 USB 传输至电脑, 实现远程数据获取和控制。读出电子学和数据处理流程如下图 4 所示。

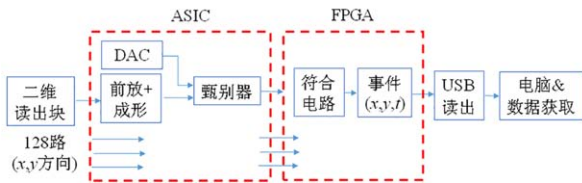


图 4 (在线彩图) 读出电子学和数据处理流程图

3 测试结果及数据分析

3.1 光束测试及结果分析

为了研究探测器性能, 利用铜靶(特征能量 8.09 keV)X 光机进行详细测试。为了对 X 光进行限束, 在 X 光机出口处放置一块孔径 1 mm、厚度 2 mm 的铜板, 通过准直将 X 光束对准探测器左上角的位置, X 光机距离探测器约 1 m。探测器工作电压为 -2 400 V, 工作气体为 Ar/CO₂(90%/10%) 混合气体。通过探测器测试光斑成像实验, 寻找光斑位置, 光斑成像数据经过 ROOT^[10]程序处理结果如图 5 所示, 图 5(a) 是光斑成像的二维图, 图 5(b) 是光斑成像的三维图。

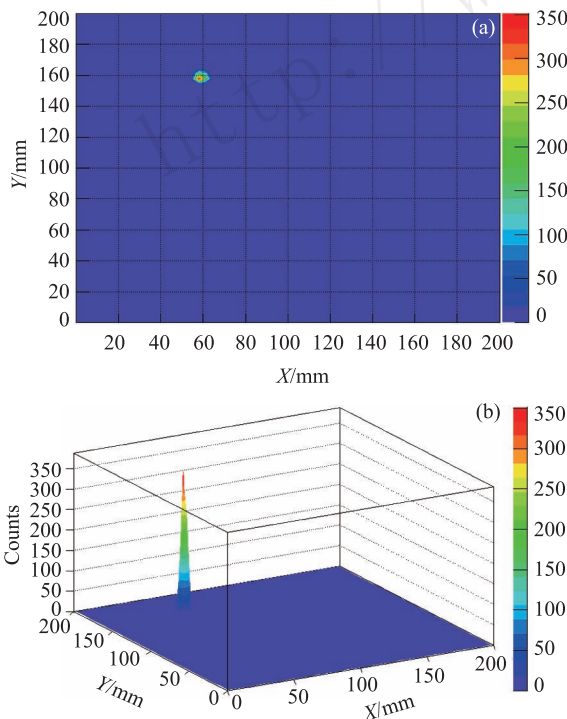


图 5 (在线彩图) 光斑在低灵敏区成像二维图(a)及三维图(b)

从图 5 可以看出, 光斑成像位于探测器的左上角,

光斑中心位置坐标约为 $x=60$ mm, $y=160$ mm, 利用这种方法可以实现对光斑位置的确定。

从图 5 中观察到光束是圆形, 并且中心位置的计数率较高。为了测量该光斑的精细分布, 将 X 光斑对准探测器入射窗的中心, 在高灵敏区进行成像测试, 实验数据用 ROOT 软件处理后的成像结果如图 6 所示, 图 6(a) 是光斑成像二维图, 图 6(b) 是光斑成像三维图。

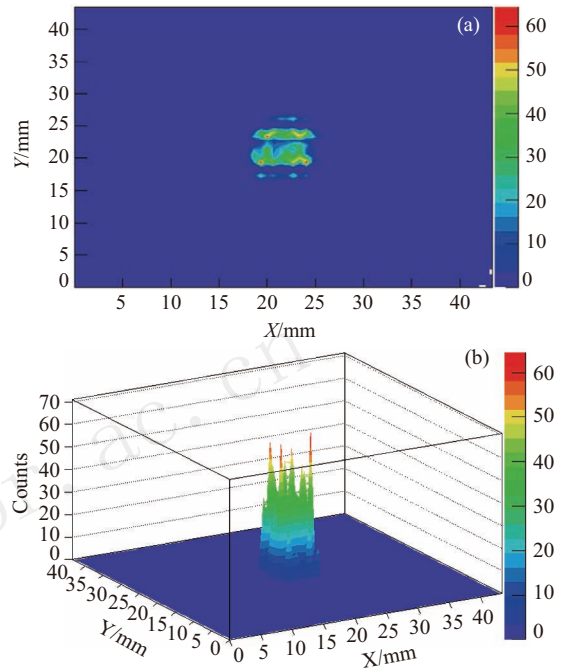


图 6 (在线彩图) 光斑在高灵敏区成像二维图(a)及三维图(b)

从图 6 可以看出, 光斑的形状并非是规整的圆形, 光斑的左右部分有凹陷, 并且光斑的上下部分不是连续的。光斑在 x 方向的半高全宽约为 6.8 mm, y 方向的半高全宽约为 9.6 mm, 该结果表明 X 光束经过 1 mm 孔限束后, 经 1 m 距离进入探测器, 束线发生了发散, 该结果可以用于 X 光束准直和调束使用, 能为实验布置带来极大便利。探测器能同时进行束斑寻迹和精细测量研究, 是该探测器一个小的创新点, 同时也说明探测器和电子学系统正常工作, 达到了预期的设计目标。

3.2 探测器位置分辨测量

采用狭缝测试探测器的位置分辨, 将厚度为 2 cm、中心位置刻有 0.1 mm 狭缝的铜板镶嵌在探测器入射窗。实验装置如图 7 所示。X 射线经过狭缝准直后垂直入射到探测器上, 经过射线对气体的电离激发, 电子学系统对感应信号的处理, 实现探测器位置分辨测试。预估探测器的位置分辨率可以达到 0.8 mm, 远大于狭缝的宽度, 所以计算探测器的位置分辨可以忽略狭缝的影响,

位置分辨率 $FWHM = \sigma \times 2.36$, σ 为电子学系统收集的数据进行高斯拟合求得的标准方差。



图 7 (在线彩图) 位置分辨实验图

实验的工作气体为 Ar/iC_4H_{10} (97%/3%) 混合气体, X 光机出射光子的能量范围为 0~10 keV。实验中, 当铜板厚度一定时, 采用的 X 射线能量非常重要, 如果能量太高, 会与铜板的铜原子发生光电效应, 产生的电子或光子进入探测器, 影响探测器的信号。并且在测试过程中要保证光子垂直进入狭缝, 防止进入狭缝的光子被铜板吸收或散射, 影响位置分辨的测量精度。测试结果如图 8 所示, 图 8(a) 是狭缝成像的二维分布图, 图 8(b) 是将 y 方向的数据投影, 进行高斯拟合, 获得 y 方向的位置分辨为 0.62 mm(FWHM)。

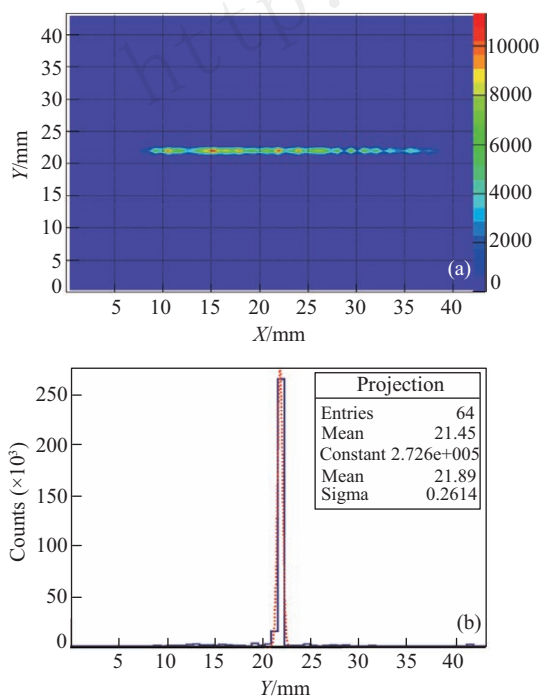


图 8 (在线彩图) 狭缝成像二维分布图 (a) 及 y 方向数据投影 (b)

将铜板旋转 90° , 测量探测器 X 方向的位置分辨, 测得结果如图 9 所示。用同样的方法进行数据处理, 图 9(b) 中虚线是拟合后的曲线, 获得探测器 x 方向位置分辨率为 0.63 mm(FWHM), 与 y 方向的结果相差很小, 处于可接受的范围内, 证实了测试结果的准确性和可靠性。

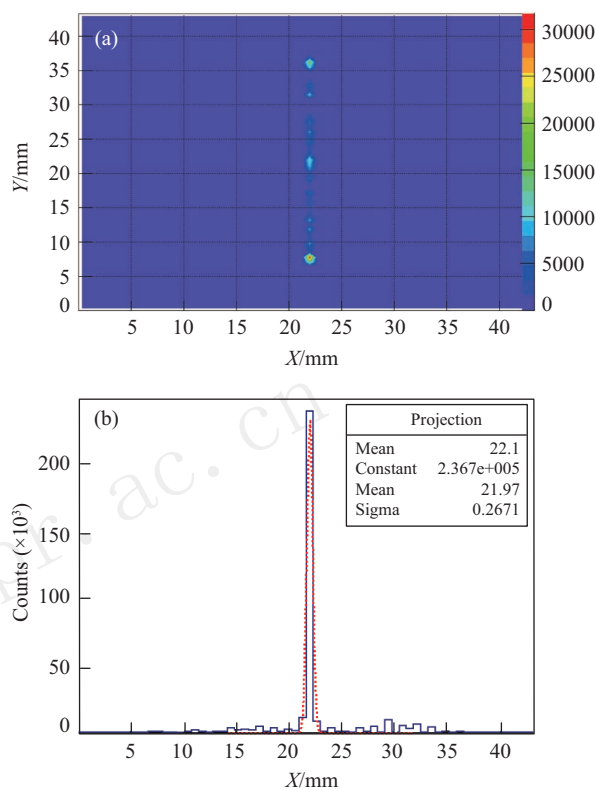


图 9 (在线彩图) 狭缝成像二维分布图 (a) 及 x 方向数据投影 (b)

同一套电子学测量高分辨区时, 读出条宽度为 0.68 mm, 位置分辨为 0.63 mm, 对 X 射线的测量, 对更大尺寸条宽读出位置时, 位置分辨接近条宽度 3.2 mm, 考虑到四周区域只用于寻找束斑, 故未测量其位置分辨。

4 结论

本文介绍了一种大面积 X 光斑寻迹探测器, 特殊的读出结构设计使得探测器既能用于 X 光斑寻迹, 又能对光斑的二维分布进行精细测量。通过在中国计量科学研究所的 X 光机上进行了详细的探测器性能测试和功能验证性实验, 探测器中心高分辨区在 x 方向的位置分辨率为 0.63 mm(FWHM), y 方向位置分辨率为 0.62 mm(FWHM)。本次探测的实验结果表明, 该探测器能达到预期目标, 中心区域分辨率能满足中国计量科学研究所对 X 射线单光子位置精准测量要求, 同时探测器

对 X 射线测量采用 event by event 读出方式, 可实时读出每一个探测到的光子的位置信息, 为计量院 X 射线单光子计量技术研究提供了支撑, 后续验证性的结果由中国计量科学研究院整理后续发表。目前该探测器已安装在 X 光机束线上服务于多种计量测量实验室, 工作稳定。

参考文献:

- [1] SAULI F. *Nucl Instr Meth A*, 1997, **386**: 531.
- [2] BACHMANN S, BRESSAN A, KAPPLER S, *et al.* *Nucl Instr & Meth A*, 2001, **471**: 971.
- [3] ALEXEEV M, BIRSA R, BRADAMANTE F, *et al.* *Nucl Instr & Meth A*, 2009, **612**(1): 174.
- [4] BADERTSCHER A, KNECHT L, LAFFRANCHI M, *et al.* *Nucl Instr & Meth A*, 2010, **617**: 188.
- [5] WANG Yanfeng, SUN Zhijia, ZHOU Jianrong, *et al.* *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, **56**(10): 1897.
- [6] WANG Tuo, ZHOU Jianrong, SUN Zhijia, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2014, **31**(1): 69. (in Chinese)
(王拓, 周建荣, 孙志嘉, 等. *原子核物理评论*, 2014, **31**(1): 69.)
- [7] CHECHIK R, BRESKIN A, SHALEM C, *et al.* *Nucl Instr & Meth A*, 2004, **535**: 303.
- [8] ZHENG Xiaocui, LI Yulan, LAI Yongfang, *et al.* *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2007, **27**(1): 89. (in Chinese)
(邓晓翠, 李玉兰, 来永芳, 等. *核电子学与探测技术*, 2007, **27**(1): 89.)
- [9] LI Ke. Experiment Study of Thermal Neutron Detector Based on nTHGEM[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016: 20. (in Chinese)
(李科. 基于nTHGEM热中子探测器的实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 20.)
- [10] The ROOT Team. The ROOT users guide[M/OL]. [2017-12-01]. http://root.cern.ch/Download/doc/User/doc/User_Guide_5.26.pdf.

Research on the X-ray Spot Tracing and the Position Resolution of THGEM Detector

LIU Chuanfeng^{1,2,3}, ZHOU Xiaojuan^{1,3}, ZHOU Jianrong^{1,3}, LU Liming^{1,3,5}, ZHU Lin^{1,3,5}, HE Cong^{1,3,5}, TAN Yingying^{1,3,5}, XU Hong^{1,3}, XIE Yuguang^{1,4}, WANG Xiaodong⁵, WU Jinjie⁶, CHEN Yuanbo^{1,3,4}, SUN Zhijia^{1,3,4,†}

- (1. Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;
2. Centre of Excellence for Advanced Materials, Dongguan 523808, Guangdong, China;
3. Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, Guangdong, China;
4. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China;
5. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421000, Hunan, China;
6. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper introduces the detector of X-ray spot tracing based on the THGEM. It is used for X ray single photon measurement technology research and measurement with an effective area of 200 mm × 200 mm. The circuit board has 128 array of high speed readout electronics based on ASIC and FPGA. And it is divided into two parts: the middle area of high sensitive and the peripheral area of low sensitive. The two parts share a set of readout electronics. The experiment tests the position and the fine structure of the beam line produced by X ray machine in National Institute of Metrology. The results of the experimental show that the detector realizes both the spot tracing and the fine structure of the spot. The position resolution is 0.63 mm in x direction and 0.62 mm in y direction in high sensitive of the detector, which achieve the desired goal of preliminary design.

Key words: THGEM detector; position resolution; spot structure; spot tracing

Received date: 27 Nov. 2017; **Revised date:** 19 Jan. 2018

Foundation item: National Key R&D Program of China (2017YFA0403702); National Natural Science Foundation of China (11635012, 11775243); Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program (2016ZT06G025); Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of ScienceS(YZ201512)

† **Corresponding author:** SUN Zhijia, E-mail: sunzj@ihep.ac.cn.