

基于阻性阳极读出方法的气体电子倍增器二维成像性能

鞠旭东 董明义 周传兴 董静 赵豫斌 章红宇 祁辉荣 欧阳群

Study of the two dimensional imaging performance for the gas electron multiplier using the resistive anode readout method

Ju Xu-Dong Dong Ming-Yi Zhou Chuan-Xing Dong Jing Zhao Yu-Bin Zhang Hong-Yu Qi Hui-Rong Ouyang Qun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 072902 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.072902

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072902>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光四象限探测器测角不确定性统计分布

[Angle measurement uncertainty statistical distribution of pulsed laser quadrant photodetector](#)

物理学报.2017, 66(1): 012901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.012901>

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>

用于反应堆中子/ $\gamma$  射线混合场测量的涂硼电离室性能

[Performances of a boron-lined ionization chamber used in neutron/ \$\gamma\$ -ray mixed field of reactors](#)

物理学报.2012, 61(8): 082901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.082901>

# 基于阻性阳极读出方法的气体电子倍增器 二维成像性能\*

鞠旭东<sup>1)2)</sup> 董明义<sup>1)2)3)†</sup> 周传兴<sup>1)2)3)</sup> 董静<sup>1)2)</sup> 赵豫斌<sup>1)2)</sup> 章红宇<sup>1)2)</sup>  
祁辉荣<sup>1)2)</sup> 欧阳群<sup>1)2)3)</sup>

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年11月24日收到; 2017年1月10日收到修改稿)

新型微结构气体探测器, 如气体电子倍增器 (gas electron multiplier, GEM) 等, 具有非常好的位置分辨率潜力 ( $\sigma < 100 \mu\text{m}$ ), 但是需要匹配大规模高密度的读出电子学, 给探测器的建设、造价、功耗、空间利用等带来极大压力. 阻性阳极读出方法可以在保持较高位置分辨率的前提下, 大幅节省电子学. 基于厚膜电阻工艺, 一种新的阻性单元阵列结构被成功开发和应用于三级级联 GEM 探测器的读出阳极. 该阻性阳极包括  $6 \times 6$  个  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的基本阻性单元, 仅需匹配 49 路读出电子学.  $^{55}\text{Fe}$  放射源 (5.9 keV) 和 X 光机 (8 keV) 实验的结果显示探测器的位置分辨率 ( $\sigma$ ) 可好于  $80 \mu\text{m}$ , 位置非线性好于 1.5%. 同时, 探测器还获得了很好的实物成像效果. 探测器的优良性能表明这种阻性阳极读出方法适用于大面积二维成像气体探测器的读出, 并可用于其他探测器的读出.

**关键词:** 阻性阳极读出, 气体电子倍增器, 二维成像, 位置分辨率

**PACS:** 29.40.Cs, 29.40.Gx, 29.30.Kv

**DOI:** 10.7498/aps.66.072902

## 1 引言

气体电子倍增器 (GEM) 探测器<sup>[1,2]</sup> 作为新型微结构气体探测器<sup>[3-7]</sup> 中的重要一员, 近 20 年来获得了极大关注和发展, 并被逐步应用于粒子物理实验、X 射线成像和中子成像等领域. 与传统气体探测器<sup>[8]</sup> 相比, GEM 探测器的突出特点是使用 GEM 膜作为电子倍增结构, 电子的雪崩倍增过程独立于读出阳极, 这使得 GEM 探测器可以灵活采用各种读出结构. 实际实验中, GEM 探测器常采用二维条读出结构并结合重心法来进行定位和成像. 但是, 一方面因为 GEM 探测器的信号仅由电子漂移感应产生, 信号的横向扩散较小 (1—3 mm),

为了确保有三根以上的读出条着火, 读出条间隙需要小于 1 mm; 另一方面, 对高精度位置分辨率 ( $\sigma < 100 \mu\text{m}$ ) 的追求, 要求读出条间隙进一步减小, 以 CERN-COMPASS 实验的 GEM 探测器<sup>[9]</sup> 为例, 其读出条间隙设计为  $400 \mu\text{m}$ , 以获得高的位置分辨率 ( $\sigma \sim 80 \mu\text{m}$ ). 相较传统丝室几个毫米的读出条间隙而言, GEM 探测器的电极密度大大增加, 需要匹配庞大的高密度电子学, 给探测器的建设、造价、功耗、空间利用等方面带来极大困难. 国内外一直在探寻和发展新型的读出结构和读出方法以达到节省电子学的目的, 如延迟线读出<sup>[10]</sup>、楔条阳极读出<sup>[11]</sup> 等.

阻性读出是一种传统的读出方法, 有一维阻性条、二维阻性平面等<sup>[12]</sup> 多种电极结构. 与常用的导

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11375219) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongmy@ihep.ac.cn

体读出电极不同, 探测器感应电荷在阻性结构上不会被立刻收集, 而是存在一个连续扩散过程, 再结合电荷分配法便可实现位置定位. 大尺寸单 Pad 阻性单元结构(如  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ) 现今仍被广泛应用于微通道板探测器<sup>[13]</sup>(micro-channel plates, MCP) 和位置灵敏硅探测器<sup>[14]</sup>(position sensitive silicon detector, PSSD) 等诸多探测器的读出上. 特别地, 为了降低新型微结构气体探测器普遍存在的打火现象, 阻性读出概念备受重视.

德国锡根大学的 Sarvestani 等<sup>[15-17]</sup> 将单 Pad 四角读出阻性单元小型化( $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ) 并做阵列扩展后, 应用于 Micro-CAT 气体探测器, 在节省电子学的基础上实现了较好的位置分辨率( $\sigma \sim 200 \mu\text{m}$ ). 我们利用 GEM 探测器对阻性阳极读出方法进行了深入的研究: 原理探测器(包含一个基本重建单元) 实验的测试结果证明了阻性阳极读出方法用于 GEM 探测器的可行性<sup>[18]</sup>; 对阻性阳极读出板的优化设计进一步改善了原理探测器的各项性能<sup>[19]</sup>.

本文主要介绍对多单元结构的阻性阳极读出 GEM 探测器的研究, 辅以新的多路电子学和触发系统以及改进的重建算法<sup>[20]</sup>, 通过对位置分辨率、位置非线性等探测器性能的分析来研究这种阻性阳极读出方法的二维成像性能和用于大面积成像的可行性.

## 2 实验装置

### 2.1 探测器结构

阻性阳极读出 GEM 探测器的基本结构如图 1 所示, 自上而下依次为入射窗、阴极、三层 GEM 膜和阳极. 入射窗为  $100 \mu\text{m}$  厚的透明 Mylar 膜, 阴极由  $50 \mu\text{m}$  厚的铝箔拉制而成, GEM 膜为购自 CERN 的  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  带框标准 GEM 膜, 阳极为自行设计研制的阻性阳极. 探测器采用分立供电模式, 利用两块 C.A.E.N.N1471H 高压插件的 7 路输出分别给阴极和三层 GEM 膜提供负高压, 阳极引出信号至读出电子学系统. 探测器的工作气体为  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$ , 工作在流气模式下. 正常工作时, 入射粒子在漂移区发生电离, 产生的原初电离电子在漂移区电场的作用下向 GEM 膜漂移. 电子在 GEM 膜的小孔中雪崩倍增, 经三层 GEM 膜级联放大后, 增益可达  $10^4-10^5$ . 第三层 GEM 膜

对正离子起到了良好的屏蔽效果, 探测器信号主要由电子在感应区的漂移产生.

图 2 为实验所用阻性阳极的基本单元结构示意图, 黑色  $5.8 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$  的方块区域为高方阻 ( $150 \text{ k}\Omega/\square$ ) 的 Pad, 紫色  $0.2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的窄线区域为低方阻 ( $1 \text{ k}\Omega/\square$ ) 的 Strip, 灰色小方块(位于背面) 为信号读出电极. 感应电荷在高方阻 Pad 上扩散, 低方阻 Strip 起到限制电荷向相邻 Pad 上扩散的作用, 最后电荷被 Pad 四角处的读出电极(Node) 收集. 实验中所用的阻性阳极包括  $6 \times 6$  个基本单元, 采用厚膜电阻工艺在  $1 \text{ mm}$  厚的陶瓷板上高温 ( $825 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 烧制而成.

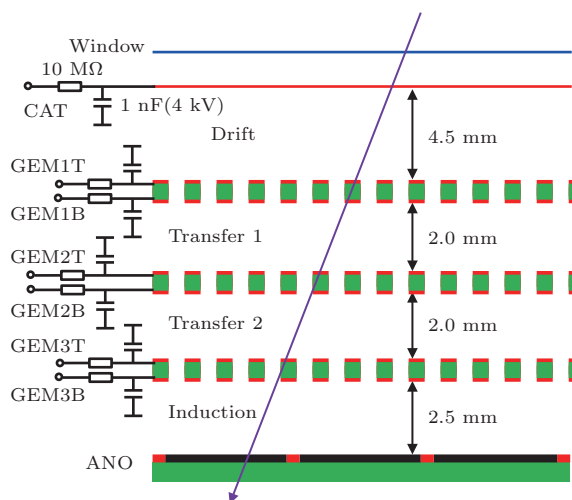


图 1 (网刊彩色) 阻性阳极 GEM 探测器整体结构示意图  
Fig. 1. (color online) Whole structure diagram of the GEM detector using the resistive anode.

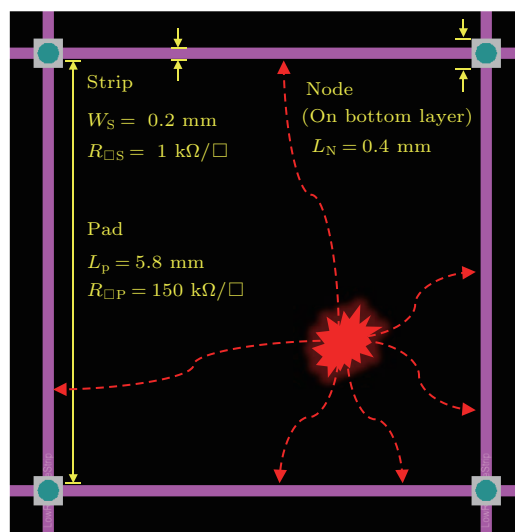


图 2 (网刊彩色) 阻性阳极基本单元结构示意图  
Fig. 2. (color online) Structure diagram of the basic resistive anode cell.

## 2.2 读出电子学

探测器读出电子学系统<sup>[21]</sup>如图3所示,它基于6U-VME 64x规范设计,由VME机箱、插件、交换机、数据获取计算机等组成.事例信号(负信号)由图2中的Node引出,经隔直电容后送入电荷灵敏前放(Signal PreAmp)放大,再送入电荷测量插件(charge measure, CM)处理.在CM插件里,信号被进一步放大,并进行滤波成形((CR)-(RC)<sup>3</sup>),再通过一个10-bit的FADC以40 MHz时钟频率进行连续的等间隔取样和瞬时数字化,数字化结果被送入数字流水线(Pipeline)中.若有Trigger信号到来,Pipeline中的数据在FPGA逻辑控制下,在指定时间窗(约1.5 μs)内寻峰,将峰值最大的ADC值写入Buffer以待PowerPC读取.

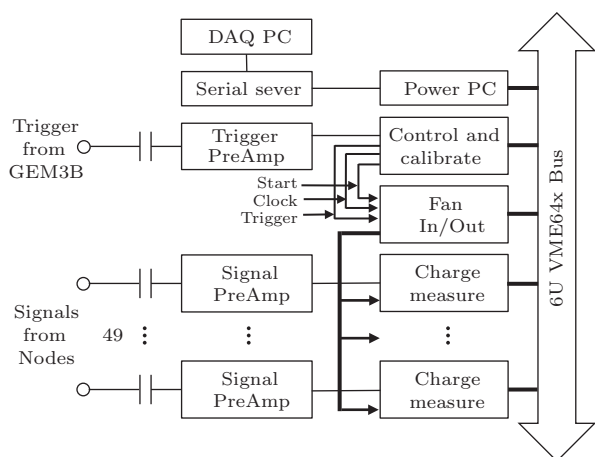


图3 探测器电子学示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the electronics.

GEM探测器的一大优点是可以利用自身GEM膜上的信号做触发,而不需要额外的探测器(如闪烁体等)提供触发信号.实验中利用GEM探测器的这一特点,使用第三层GEM膜下表面上的信号作为触发信号(正信号),实现了探测器的自触发<sup>[22]</sup>.为了防止同一事例产生多次触发以及信号堆积,采用设置veto time(约2 μs)的方式处理触发信号,即第一次过阈后,忽略veto time内的所有其他触发信号.触发信号同样经过一个电荷灵敏前放(Trigger PreAmp)后送入控制和刻度插件(control and calibrate, CAC).CAC插件将触发信号进一步放大,做阈值甄别后转换为触发电平(LVPECL电平,200 ns)信号输出,同时还输出开始信号和时钟信号.三种控制信号经过扇入扇出插件(fan in/out, FIO)后,分发到多个CM插件以控

制数据获取进程.图4为利用<sup>55</sup>Fe放射源(5.9 keV)获取的触发信号示波器图片,为了确保触发的质量和数量,触发信号、触发电平信号和事例信号必须严格一一对应.

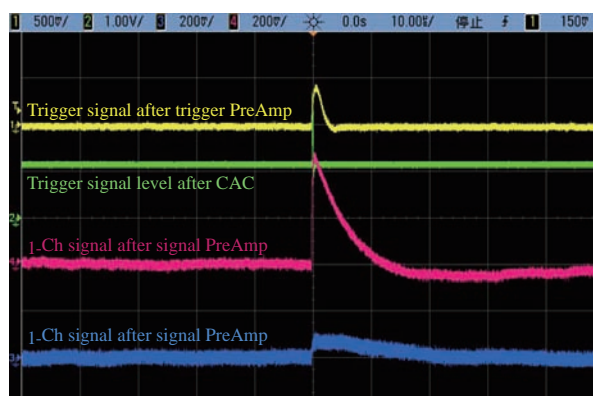


图4 (网刊彩色)触发信号示波器截图,利用<sup>55</sup>Fe放射源(5.9 keV)取得.黄线为触发前放的输出信号,绿线为CAC插件输出的触发电平信号,红线和蓝线为两路信号前放输出的差分信号的正相端信号(事例信号)

Fig. 4. (color online) Oscilloscope photo of the trigger signal by using the <sup>55</sup>Fe source (5.9 keV). The yellow line is the trigger signal after the Trigger PreAmp. The green line is the trigger signal level after the CAC. The red and blue lines are the event signals after the Signal PreAmp.

## 2.3 电子学基线和刻度

为了消除或减弱读出电子学系统对探测器测试的影响,需要对电子学的基线和通道一致性进行分析.

电子学基线会影响通道电荷测量的准确性,实验数据需要先扣除基线.实验中采用本底取数的方式获得电子学基线:在无放射源的情况下,设置ADC阈值为0,取数10万次,以各通道取数的高斯拟合均值作为对应通道的基线参考值.图5为一次实验中对电子学基线的测量结果,图5(a)为第15个通道的基线测量结果,本底计数符合高斯分布,其拟合结果为(28.87 ± 0.558) LSB;图5(b)为对实验中用到的所有49路通道的基线均值的统计,高斯拟合结果为(33.17 ± 2.07) LSB.这种用本底取数计算基线的不足是不能反映基线的实时变化,但已具有足够的参考意义,实验时在每次取数前先进行一次本底取数.

阻性阳极读出方法根据各通道获得的电荷信息并结合重心法来实现位置定位,因而电子学的通道一致性对实验测量非常重要,必须要通过刻度和校准来减弱和消除通道间的差异.

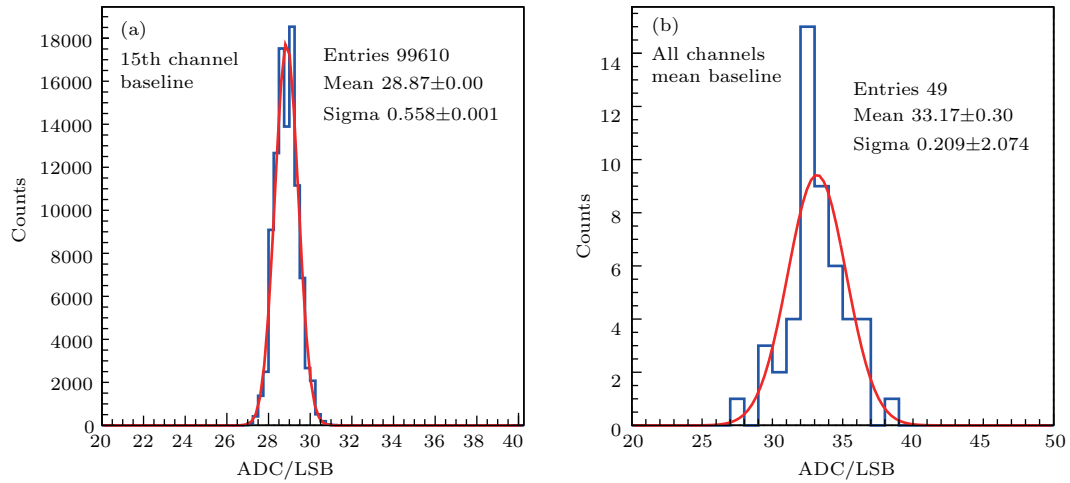


图5 (网刊彩色) 电子学基线测量图 (a) 第15路通道的基线取数与高斯拟合结果; (b) 统计所有49路通道的基线均值, 并用高斯分布进行拟合

Fig. 5. (color online) Measurements of the electronics baseline: (a) Baseline of the fifth channel with a gauss fitting; (b) baseline mean value statistics of the total 49 channels with a gauss fitting.

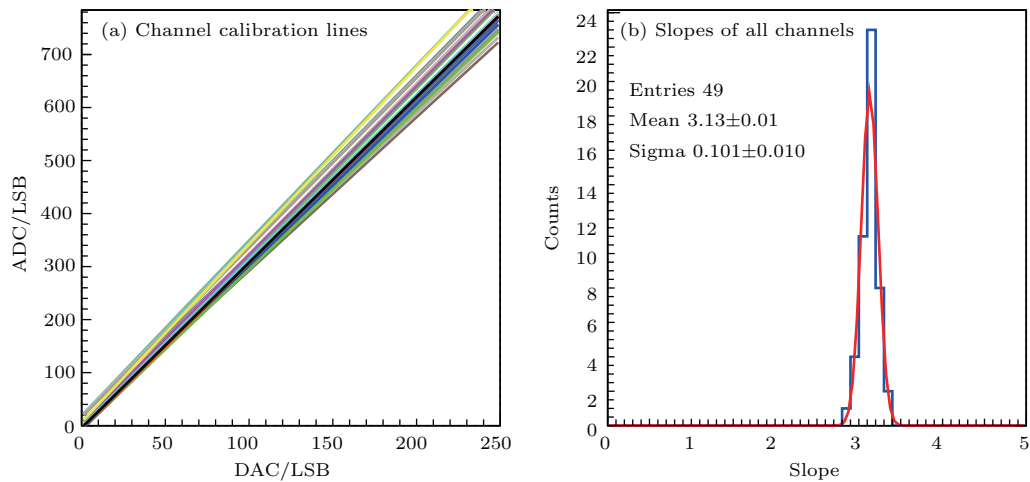


图6 (网刊彩色) 电子学刻度图 (a) 49路电子学通道的输入和输出线性关系; (b) 6(a)中49路通道线性拟合的斜率的统计结果, 并用高斯分布进行拟合

Fig. 6. (color online) Electronics calibration: (a) Line relationships between the input DAC and the output ADC of the total 49 channels; (b) slopes statistics of the 49 lines in the Fig. 6(a) with a gauss fitting.

读出电子学系统具有刻度功能(CAC插件), 通过模拟探测器的输出电荷大小(DAC), 经过与真实事例信号相同的处理过程后, 获得对应的电子学输出值(ADC). 通过步进扫描的方式便可获得电子学各通道对输入电荷的响应情况. 电子学各通道刻度扫描结果如图6(a)所示, 各通道的线性非常好, 但各通道的斜率并不一样. 图6(b)进一步统计了图6(a)中所有通道线性拟合的斜率, 并用高斯分布进行拟合, 结果为 $3.139 \pm 0.109$ , 各通道间存在一定偏差. 为了保证电子学各通道电荷测量的一致性和均匀性, 需要利用刻度扫描获得的线性关系将各通道获得的电荷信息反向刻度回输入值. 同基

线测量一样, 在每次取数前需要对电子学进行线性刻度.

### 3 实验结果

#### 3.1 实验设置

利用 $^{55}\text{Fe}$ 放射源(5.9 keV)验证探测器可以正常工作后, 为了获得高的计数率, 我们利用X光机(8 keV)来研究探测器的位置分辨率和二维成像性能. X光机实验的实验装置如图7所示, 其中图7(a)为装置的示意图, 图7(b)为实物图. 狭缝(40  $\mu\text{m}$ )紧贴在探测器的入射窗上, X光机(8 keV)

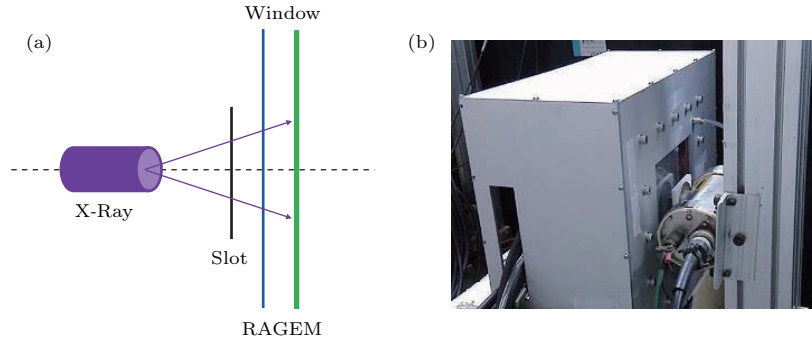


图7 (网刊彩色) X光机实验装置图 (a) 装置示意图; (b) 装置实物图

Fig. 7. (color online) X-ray machine test equipments: (a) The schematic of the test; (b) the real photo of the test.

紧贴在狭缝上, 其发出的X射线经过狭缝后垂直射入探测器中, 经过GEM探测器的雪崩倍增之后, 在阻性阳极上会形成狭缝的像, 根据成像效果可进一步分析探测器的位置分辨率等性能.

### 3.2 位置分辨率

位置分辨率是反映探测器成像性能的一个重要参数, 测量位置分辨率的常用方法是利用束流望远镜系统分析被测探测器对入射粒子径迹的分辨能力, 但是受限于束流装置和束流时间等因素, 人们也常用狭缝、刃边等方法来测量探测器的位置分辨率<sup>[23]</sup>. 本实验中, 我们利用狭缝成像的方法来分析采用阻性阳极读出方法的GEM探测器的位置分辨率性能. 其基本原理是, 探测器测量到的入射粒子分布(实验分布,  $M(x')$ )可以看作入射粒子射入探测器之前的分布(真实分布,  $T(x)$ )与探测器响应函数( $R(x, x')$ )的卷积<sup>[24]</sup>:

$$M(x') = T(x) \otimes R(x, x') = \int_{-\infty}^{\infty} T(x)R(x, x')dx. \quad (1)$$

根据中心极限定理, 探测器响应函数(即探测器的测量误差)服从标准正态分布:

$$R(x, x') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

其中 $\sigma$ 表征探测器的本征位置分辨率.

假设 $T(x)$ 已知, 则 $R(x, x')$ 的参数可通过对实验数据的拟合得到. 例如, 假设真实分布为 $\delta$ 分布, 即 $T(x) = \delta(x - x_0)$ , 则

$$M(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0)R(x, x')dx = R(x_0, x'), \quad (3)$$

即实验分布与探测器的响应函数一致. 换句话说, 可以通过对一个无穷细狭缝的成像来获得 $R(x_0, x')$ , 实验中利用一个非常细的狭缝( $40 \mu\text{m}$ )来近似 $\delta$ 分布.

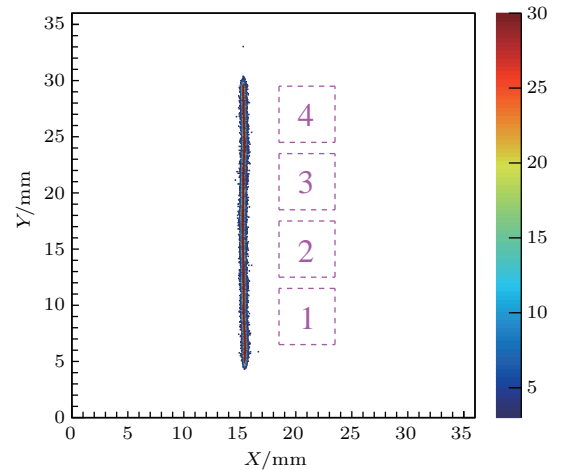


图8 (网刊彩色) X光机(8 keV)对 $40 \mu\text{m}$ 宽钢制狭缝的二维成像图 狭缝厚度为9 mm, 粉色虚框与数字代表Y方向高阻Pad的相对位置

Fig. 8. (color online) Two dimensional imaging of the  $40 \mu\text{m}$  slot by using the X-ray machine (8 keV). The thickness of the slot is 9 mm. The pink dashed frames and numbers represent the relative positions of the pads with high surface resistivity along Y axis.

图8为用X光机(8 keV)对该 $40 \mu\text{m}$ 宽狭缝的二维成像结果, 狭缝沿Y方向覆盖了多个阻性单元, 粉色虚框表示阻性单元的Y向相对位置. 如前文所述, 利用高斯分布对图8中标记为2处对应阻性单元内的狭缝成像实验数据在X方向上的投影进行拟合, 结果如图9所示, 其中标准偏差为: $\sigma = 73.53 \mu\text{m}$ . 由于狭缝并非理想的无穷细狭缝, 且X光机发出的X射线也非均匀单色光, 狭缝在读出阳极上的成像会有一定的投影放大. 狭缝对探测

器位置分辨率的贡献近似为均匀分布, 可以通过经验公式

$$\sigma^2 = \sigma_D^2 + \left(\frac{W}{\sqrt{12}}\right)^2$$

来扣除. 其中,  $\sigma$  为实验获得的位置分辨率,  $\sigma_D$  为探测器的本征位置分辨率,  $W$  为狭缝的宽度, 易得  $\sigma_D = 72.62 \mu\text{m}$ . 这表明阻性阳极读出方法具有与二维条读出结构相比拟的位置分辨率性能, 而阻性阳极结构的基本单元尺寸比条读出结构大 1—2 个数量级, 因而可以达到节省电子学的目的.

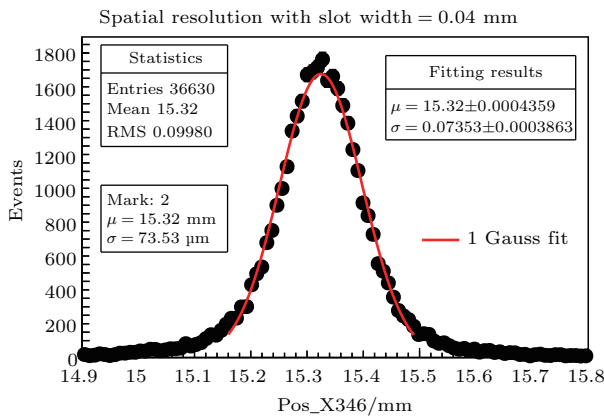


图 9 (网刊彩色) 采用阻性阳极读出方法的 GEM 探测器位置分辨率测量结果 拟合数据为图 8 中标记为 2 处对应的阻性单元内的狭缝成像数据

Fig. 9. (color online) Spatial resolution of the GEM detector using the resistive anode readout method. The fitting data is from the imaging of the slot with mark 2 in the Fig. 8.

表 1 图 8 中各阻性单元内狭缝成像数据位置分辨率的拟合结果

Table 1. Spatial resolution fitting results of the different slot imaging parts shown in the Fig. 8.

Mark	$\mu/\text{mm}$	$\sigma/\mu\text{m}$	$\sigma_D/\mu\text{m}$
1	15.41	79.37	78.52
2	15.32	73.53	72.62
3	15.35	70.22	69.26
4	15.38	77.04	76.17

进一步分析图 8 中 4 个标识对应的阻性单元内狭缝成像数据的位置分辨率, 结果如表 1 所列: 探测器的位置分辨率好于  $80 \mu\text{m}$ ; 且不同阻性单元内的位置分辨率一致性较好. 表 1 中的均值 ( $\mu/\text{mm}$ ) 一栏同时反映了探测器 Y 向的成像线性, 其偏差小于 0.6%, 考虑到狭缝自身上下两端处的加工缺陷,

这一偏差已经足够好, 预期探测器具有良好的成像能力.

### 3.3 位置线性

位置线性是影响探测器成像性能的另一重要参数, 对大面积成像尤为重要. 阻性阳极读出方法内禀的枕形失真现象和阻性读出板面电阻率的均匀性都会影响探测器的位置线性, 我们通过改进重建算法和优化阻性阳极读出板的设计获得了好的位置线性 [19].

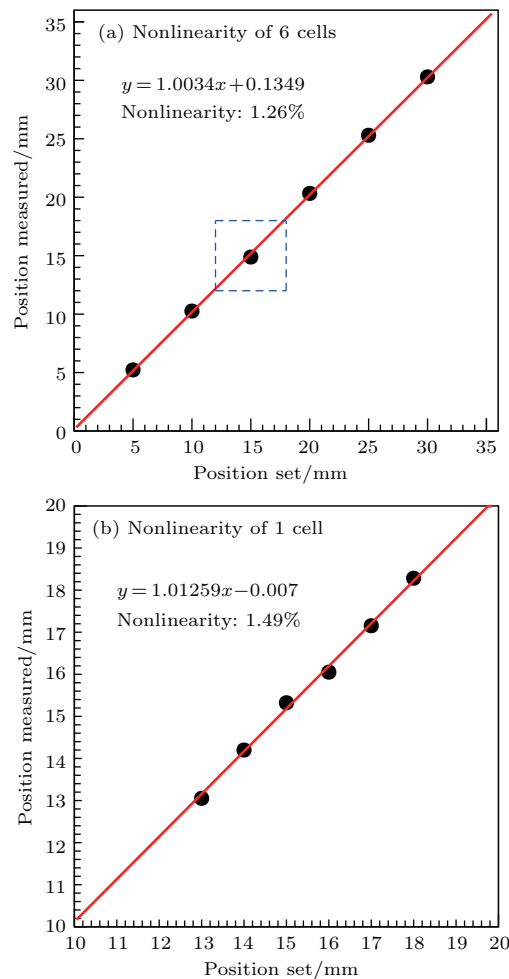


图 10 (网刊彩色) 阻性阳极读出板 X 方向位置线性扫描结果, 数据来自 X 光机 (8 keV) 对  $40 \mu\text{m}$  狭缝的成像结果 (a) 对所有 6 个阻性单元的位置线性扫描结果; (b) 对一个阻性单元内部的位置线性扫描结果, 对应图 9 (a) 的蓝色虚框位置

Fig. 10. (color online) Scanning of the position linearity of the detector along X axis, the data is from the slot imaging by using the X-ray machine: (a) Scanning of all 6 resistive cells; (b) detailed scanning of a single resistive cell which is the blue dashed frame shown in the Fig. 9 (a).

为了研究探测器的位置线性, 利用X光机(8 keV)对狭缝(40  $\mu\text{m}$ )做步长为1 mm的步进扫描成像, 并分析设定位置和测量位置之间的线性关系. 定义探测器的位置非线性为测量位置与对应线性拟合值之间的偏差:

$$\delta = \frac{\sqrt{\langle (x_M - x_F)^2 \rangle}}{L} \times 100\%,$$

其中,  $\delta$ 为探测器的位置非线性,  $x_M$ 为设定位置对应的测量值,  $x_F$ 为设定位置对应的线性拟合值,  $L$ 为阻性单元的边长(6 mm).

图10为位置线性扫描的结果, 其中图10(a)为对整块阻性读出板6个阻性单元的扫描结果, 位置非线性为1.26%; 图10(b)为对图10(a)中蓝色虚框处阻性单元内部的扫描结果, 位置非线性为1.49%. 结果显示探测器在单个阻性单元和整个阳极平面上都具有良好的线性性能, 这进一步表明了探测器具有很好的成像潜力.

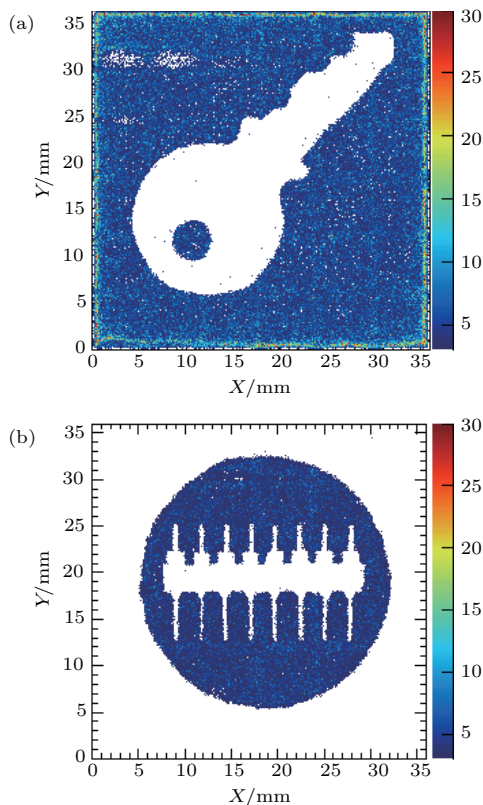


图11 (网刊彩色) 探测器二维成像图, 利用X光机(8 keV)取数获得 (a) 一个钥匙的X射线成像图; (b) 8个排针的X射线成像图, 排针间距为2.54 mm, 排针直径为0.5 mm

Fig. 11. (color online) Two dimensional imaging by using the X-ray machine (8 keV): (a) Imaging of a key; (b) imaging of 8 pins with the pitch 2.54 mm and the diameter 0.5 mm.

### 3.4 二维成像能力

相较分立式二维条读出电极结构, 阻性阳极读出方法的电极是连续的, 虽然利用低阻条来限制电荷在相邻高阻Pad之间的扩散, 但是电荷在整个阻性平面上的扩散仍是连续的, 因而它的成像也是连续的, 更适合应用于二维成像领域. 我们同样利用X光机(8 keV)来研究探测器的二维成像性能, 将成像物体黏贴在探测器入射窗上, X光机距离探测器约80 cm以使得X射线光斑可以覆盖整个阳极平面.

图11为探测器的X射线成像结果, 其中图11(a)为对一个钥匙的成像图片, 图11(b)为对8个排针的成像图片. 探测器对两者的整体成像效果都很好, 没有明显畸变. 图11(a)中钥匙的边缘齿痕形状清晰准确, 圆形区域也没有畸变. 图11(a)左上角的白色缺陷是因为上下两个高阻Pad的电气连接不够好导致的, 在后续的制板中需要改进消除. 图11(b)中排针的直径为0.5 mm, 间距为2.54 mm, 平行的排针成像反映了探测器具有良好的均匀性和线性.

## 4 结 论

本文利用GEM探测器研究了阻性阳极读出方法用于多单元大面积二维成像领域的可行性. 我们利用X光机对采用这种读出方法的GEM探测器进行了系统的测试研究: 探测器的位置分辨率可好于80  $\mu\text{m}$ , 与采用二维条读出结构的探测器性能相当; 探测器的位置非线性好于1.5%, 表明探测器具有良好的成像均匀性; 探测器对实物的成像实验则进一步证明其具有很好的二维成像能力.

实验结果表明这种阻性阳极读出方法在节省电子学的前提下完全适用于大面积二维成像领域, 这为气体探测器(尤其是二维射线成像探测器)的读出提供了新的备选方案. 下一步可以考虑将阻性单元的尺寸和数量进一步增大, 以覆盖更大的灵敏面积并推广应用于实际领域, 如X射线成像和中子成像等.

特别感谢盛华义老师和吕新宇博士在电子学系统上的悉心指导和帮助, 感谢修青磊博士在重建算法上的讨论!



## 参考文献

- [1] Sauli F 1997 *Nucl. Instrum. Meth. A* **386** 531
- [2] Dong J, Lü X Y, Liu B, Liu R G, Ma X Y, Wang L, Chen Y B, Ouyang Q, Xie Y G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6029 (in Chinese) [董静, 吕新宇, 刘贲, 刘荣光, 马晓妍, 王岚, 陈元柏, 欧阳群, 谢一冈 2010 物理学报 **59** 6029]
- [3] Fan S N, Wang B, Qi H R, Liu M, Zhang Y L, Zhang J, Liu R G, Yi F T, Ouyang Q, Chen Y B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 122901 (in Chinese) [范胜男, 王波, 祁辉荣, 刘梅, 张余炼, 张建, 刘荣光, 伊福廷, 欧阳群, 陈元柏 2013 物理学报 **62** 122901]
- [4] Fan R R, Hou F J, Ouyang Q, Fan S N, Chen Y B, Yi F T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 092901 (in Chinese) [樊瑞睿, 侯凤杰, 欧阳群, 范胜男, 陈元柏, 伊福廷 2012 物理学报 **61** 092901]
- [5] Yang H R, Hu B T, Duan L M, Xu H S, Li C Y, Li Z Y, Zhang X D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2141 (in Chinese) [杨贺润, 胡碧涛, 段利敏, 徐珊瑚, 李春艳, 李祖玉, 张小东 2008 物理学报 **57** 2141]
- [6] Shekhtman L 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **494** 128
- [7] Maxim T 2013 *Modern Phys. Lett. A* **28** 1340022
- [8] Liu J B 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘建北 2005 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [9] Altunbas M C 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **490** 177
- [10] Guedes G P, Breskin A, Chechik R, Vartsky D, Bar D, Barbosa A F, Marinho P R B 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **513** 473
- [11] Zhang A W, Bhopatkar V, Hansen E, Hohlmann M, Khanal S, Phipps M, Starling E, Twigger J, Walton K 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **811** 30
- [12] Doke T, Kikuchi J, Yamaguchi H, Yamaguchi S, Yamamura K 1987 *Nucl. Instrum. Meth. A* **261** 605
- [13] Lampton M, Carlson C W 1979 *Rev. Sci. Instrum.* **50** 1093
- [14] Banu A, Li Y, McCleskey M, Bullough M, Walsh S, Gagliardi C A, Trache L, Tribble R E, Wilburn C 2008 *Nucl. Instrum. Meth. A* **593** 399
- [15] Sarvestani A, Besch H J, Junk M, Meissner W, Pavel N, Sauer N, Stiehler R, Walenta A H, Menk R H 2008 *Nucl. Instrum. Meth. A* **419** 444
- [16] Wagner H, Besch H J, Menk R H, Orthen A, Sarvestani A, Walenta A H, Walliser H 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **482** 334
- [17] Wagner H, Orthen A, Besch H J, Martoiu S, Menk R H, Walenta A H, Werthenbach U 2004 *Nucl. Instrum. Meth. A* **523** 287
- [18] Dong M Y, Xiu Q L, Liu R G, Zhang J, Ouyang Q, Chen Y B 2013 *Chin. Phys. C* **37** 026002
- [19] Ju X D, Dong M Y, Zhao Y C, Zhou C X, Ouyang Q 2016 *Chin. Phys. C* **40** 086004
- [20] Xiu Q L, Dong M Y, Liu R G, Zhang J, Ouyang Q, Chen Y B 2013 *Chin. Phys. C* **37** 106002
- [21] Ju X D 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [鞠旭东 2016 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [22] Zhao Y C, Dong M Y, Ju X D, Zhou C X, Ouyang Q, Zhao S J 2016 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **36** 565 (in Chinese) [赵逸琛, 董明义, 鞠旭东, 周传兴, 欧阳群, 赵书俊 2016 核电子学与探测技术 **36** 565]
- [23] Lü X Y, Fan R R, Chen Y B, Ouyang Q, Liu R G, Liu P, Qi H R, Zhang J, Zhao P P, Zhao D X, Zhao Y B, Zhang H Y, Sheng H Y, Dong L Y 2012 *Chin. Phys. C* **36** 228
- [24] Zhu Y S 2006 *Probability and Statistics in Experimental Physics* (Beijing: The Science Publishing Company) p148 (in Chinese) [朱永生 2006 实验物理中的概率和统计 (北京: 科学出版社) 第 148 页]

# Study of the two dimensional imaging performance for the gas electron multiplier using the resistive anode readout method\*

Ju Xu-Dong<sup>1)2)</sup> Dong Ming-Yi<sup>1)2)3)†</sup> Zhou Chuan-Xing<sup>1)2)3)</sup> Dong Jing<sup>1)2)</sup>  
Zhao Yu-Bin<sup>1)2)</sup> Zhang Hong-Yu<sup>1)2)</sup> Qi Hui-Rong<sup>1)2)</sup> Ouyang Qun<sup>1)2)3)</sup>

1) (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2) (State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 24 November 2016; revised manuscript received 10 January 2017 )

## Abstract

The new type of micro-pattern gaseous detector (MPGD) like the gas electron multiplier (GEM), features the advantage of good spatial resolution ( $\sigma < 100 \mu\text{m}$ ). However, abundant and high density electronic channels are needed to obtain the high spatial resolution, which will lead to a great pressure on the detector construction, power consumption, spatial utilization, etc. The resistive anode readout method can help to obtain a good spatial resolution comparable to the pixel readout structure with an enormous reduction of the electronic channels. By using the thick film resistor technology, a new type of resistive structure, composed of high resistive square pad array with low resistive narrow border strips, is developed and applied to the readout anode of the triple GEM detector. For the resistive anode readout board used in the experiment, there are  $6 \times 6$  resistive cells, which means that the detector needs only 49 electronics channels. To obtain a good spatial resolution, the cell size is set to be  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ . The surface resistivity of the pads and the strips are  $150 \text{ k}\Omega/\square$  and  $1 \text{ k}\Omega/\square$ , respectively. The performances of the detector, especially the two-dimensional imaging performance, are studied by using a  $^{55}\text{Fe}$  (5.9 keV) source and an X ray tube (8 keV). The test results show that the spatial resolution of the detector is better than  $80 \mu\text{m}$  ( $\sigma$ ) by using the imaging of a  $40 \mu\text{m}$  wide slot, and the nonlinearity is better than 1.5% by the scanning along the  $x$ -axis of the readout board in the steps of 1 mm. Furthermore, quite a good two-dimensional imaging capability is achieved by the detector. These good performances of the detector show the feasibility of the resistive anode readout method for the GEM detector with large area and other detectors with similar structures in the two-dimensional imaging applications.

**Keywords:** resistive anode readout, gas electron multiplier, two dimensional imaging, spatial resolution

**PACS:** 29.40.Cs, 29.40.Gx, 29.30.Kv

**DOI:** 10.7498/aps.66.072902

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11375219).

† Corresponding author. E-mail: [dongmy@ihep.ac.cn](mailto:dongmy@ihep.ac.cn)