中国物理学会高能物理分会第十二届全国粒子物理学术会议

基于GEM探测器的阻性阳极读出方法研究

董明义、鞠旭东、赵逸琛、修青磊、欧阳群

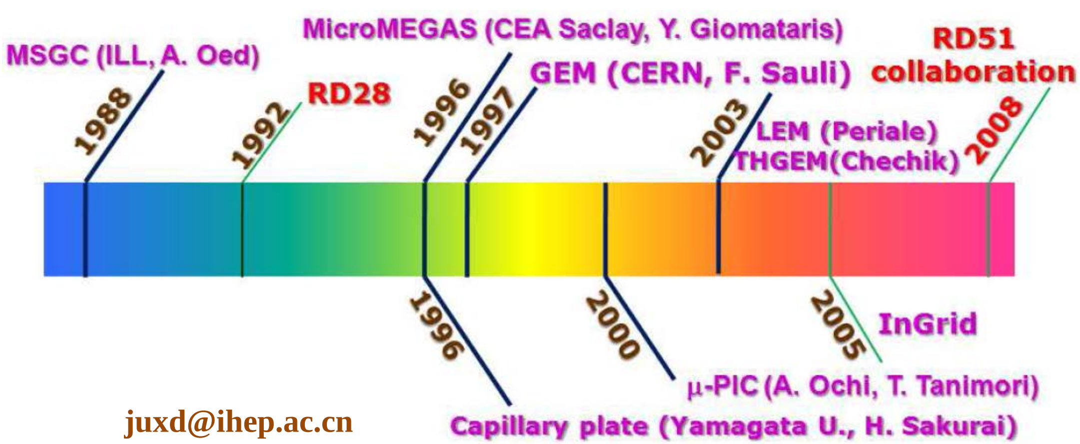
核探测与核电子学国家重点实验室
State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

- 研究背景
- 阻性阳极的设计与优化
- 探测器样机研制与测试
- 总结展望

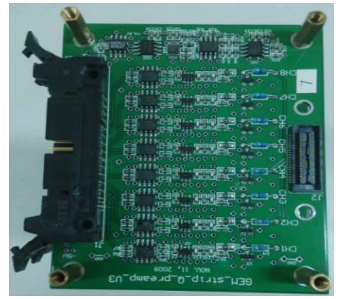
研究背景

- 传统气体探测器，如丝室等
  - 造价低廉、增益大、物质量小、性能可调
  - 位置分辨率、计数率、老化等改进空间不大
  - 难以适应高能量、高亮度粒子物理实验需求
- 新型微结构气体探测器 MPGD
  - Micro-Pattern Gaseous Detector
  - 光刻技术的进步带来新的思路
  - 保留传统气体探测器性能优点
  - 位置分辨率和计数率能力极大提高
  - 典型代表
    - MicroMegas
    - Gas Electron Multiplier
- GEM 探测器
  - 粒子物理实验
    - HERA-B、COMPASS、LHCb、TOTEM、KLOE-2、NA61/SHINE ……
  - X 射线、中子成像等领域
- 高密度电子学通道数
  - 信号横向扩散小
    - 1 – 3 mm
    - 条或块读出 + 重心法 $\Rightarrow$ Pitch < 1 mm
  - 高位置分辨率需求和潜力
    - COMPASS
      - $\sigma = 78.7\ \mu m \Rightarrow \text{Pitch} = 400\ \mu m$

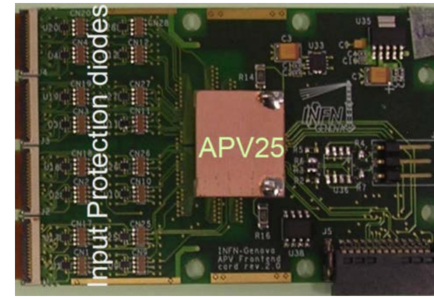


阻性阳极读出方法

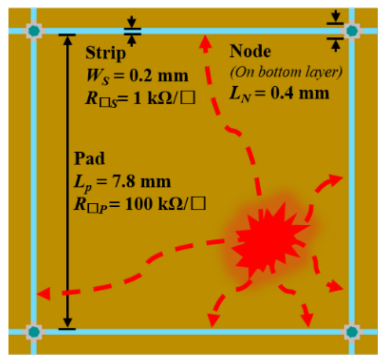
- **电子学角度**
  - **ASIC ⟹ APV25**
- **探测器角度**
  - **锯齿读出 Zigzag**
  - **开关电容阵列 Switch Array**
  - **延迟线读出 Delay Line**
  - **楔条阳极读出 WSA**
  - **阻性阳极读出 Resistive Anode**
    - **Pad**：高方阻
    - **Strip**：低方阻
    - **Node**：接前放
    - 阵列扩展
- **Resistive Anode GEM**
  - **TGEM 原理探测器**
    - **16** 路，**3 × 3 Cell**
  - **阻性阳极的优化**
    - 块条阻值比
    - 方阻均匀性
    - **Cell** 尺寸……

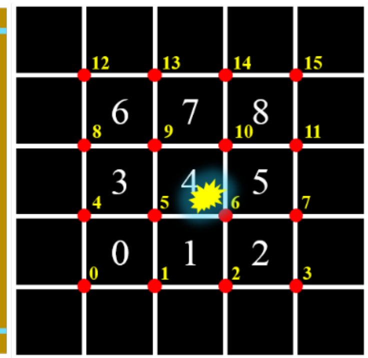


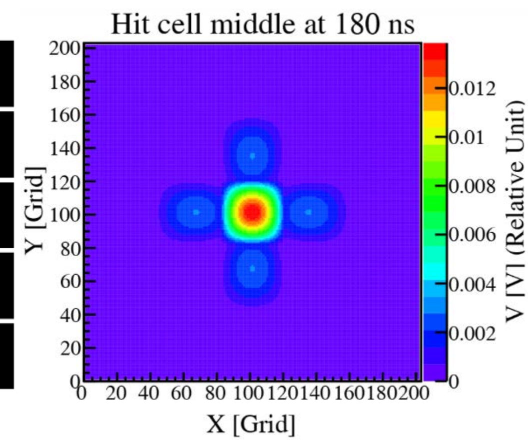
IHEP 板极电荷灵敏前放 -- 8通道

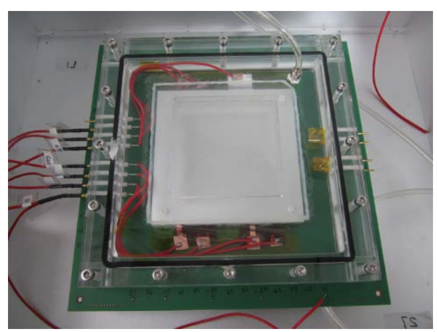


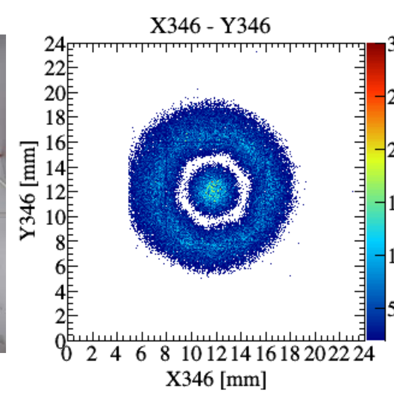
COMPASS 使用的 APV25 芯片 — 128 通道

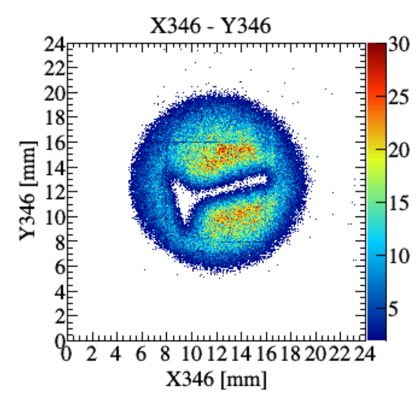




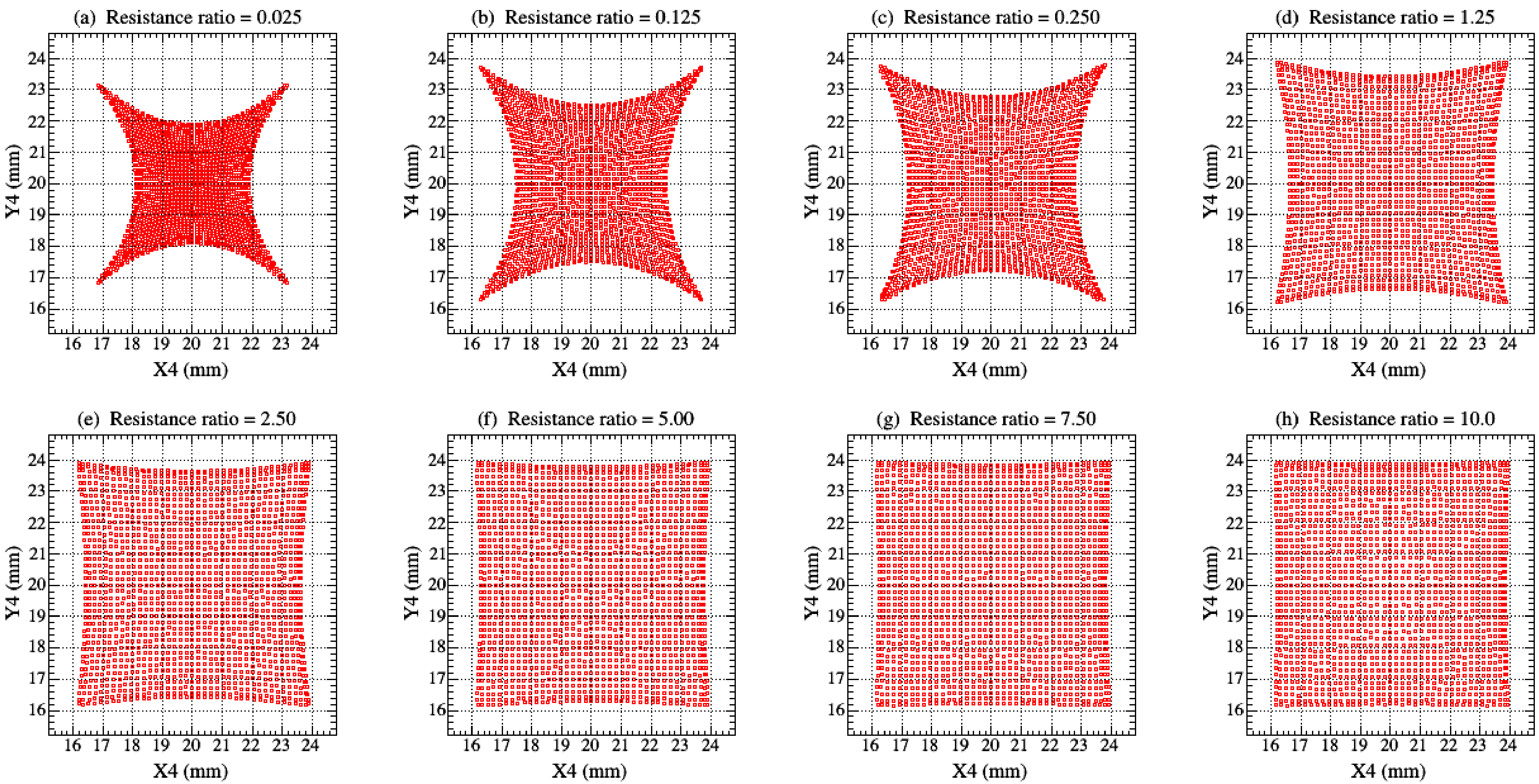






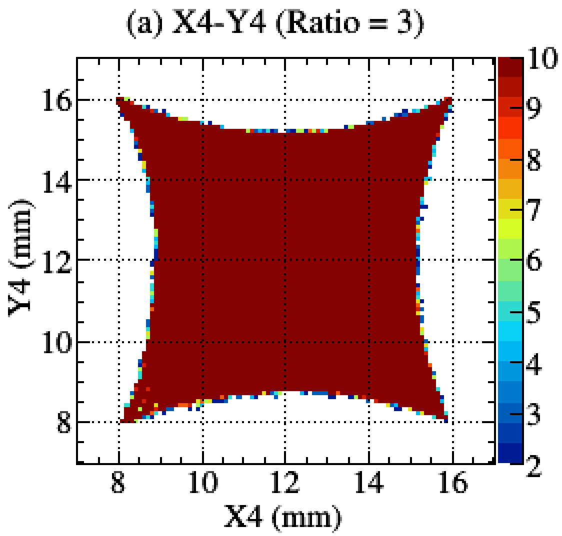


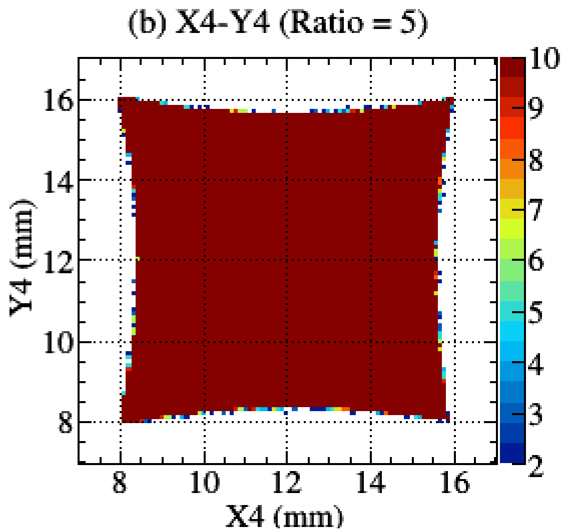
阻性阳极优化：Pad和Strip阻值比（模拟）



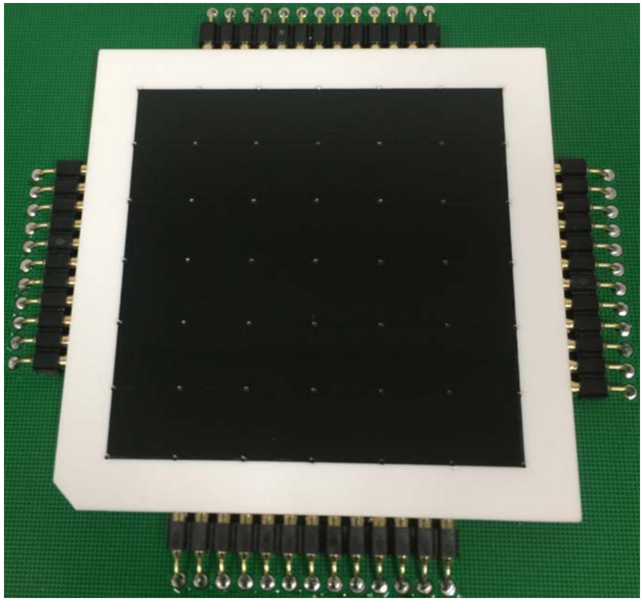
- 阻值定义：$R_P = R_{\square P}$; $R_S = R_{\square S} \cdot \frac{L}{W}$
- 块条阻值比越大，枕形失真越小；块条阻值比大于 5 时，枕形失真已经很小了
  - 块条阻值比 = 0.025，对应方阻比为 1:1，　电荷损失率 > 40% ⇒ 无低阻条阻挡情况
  - 块条阻值比 = 5.000，对应方阻比为 200:1，电荷损失率 ~ 3%　⇒ 方阻设计的参考值

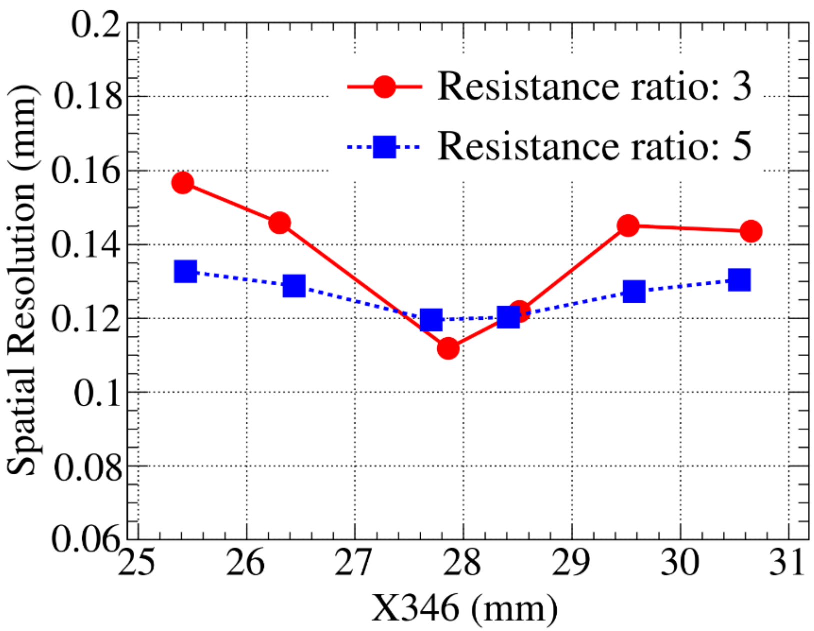
阻性阳极优化：Pad和Strip阻值比（实验）



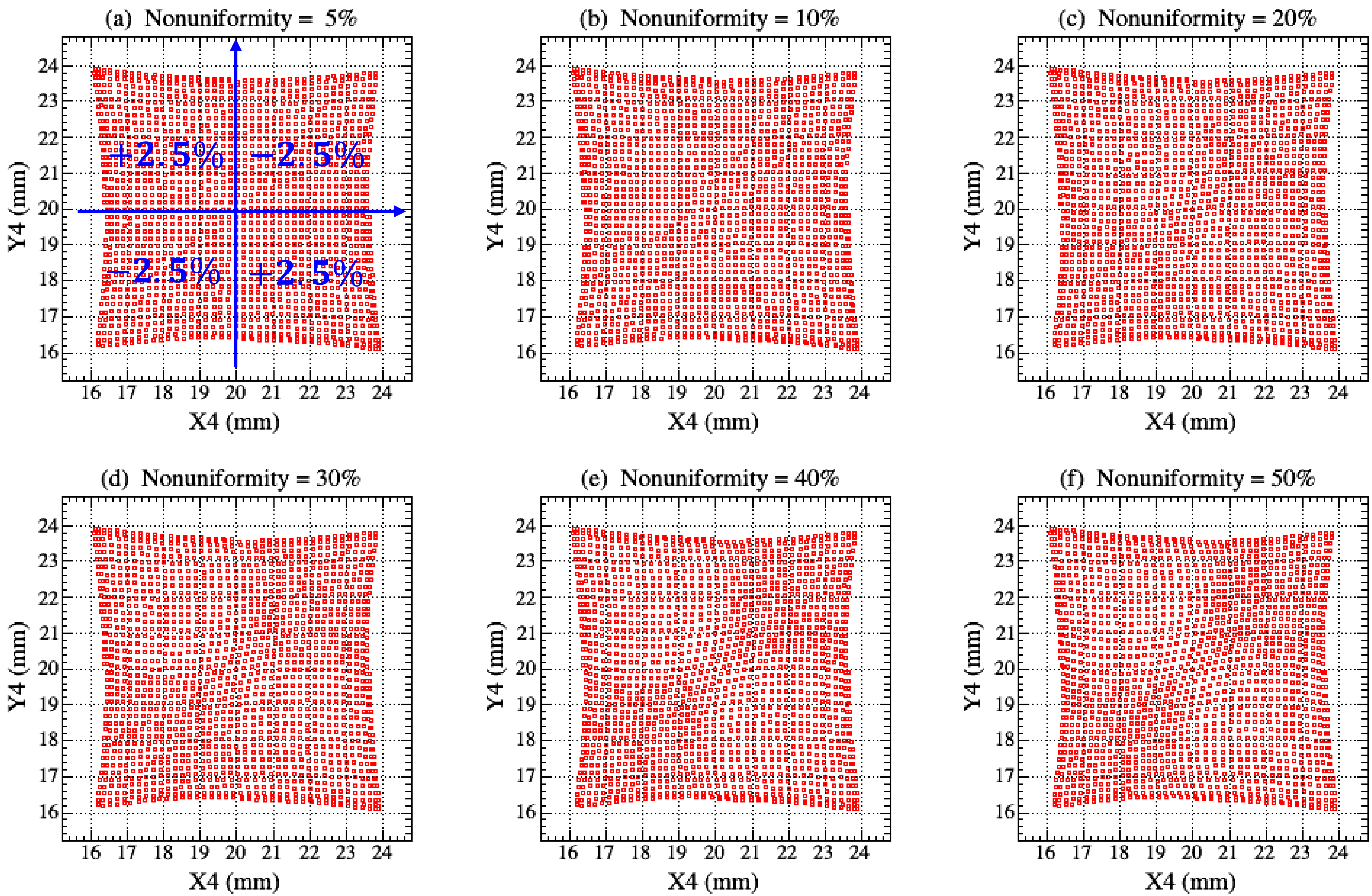


- 实验结果
  - 与模拟结果相符
  - 块条电阻比大，枕形失真小
  - 单Cell位置分辨率步进扫描
    - Cell中心位置分辨率好于Cell边缘
    - 块条阻值比大，位置分辨率小且均匀

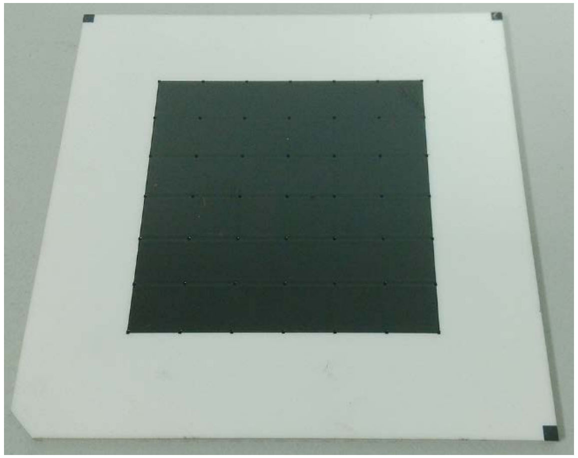




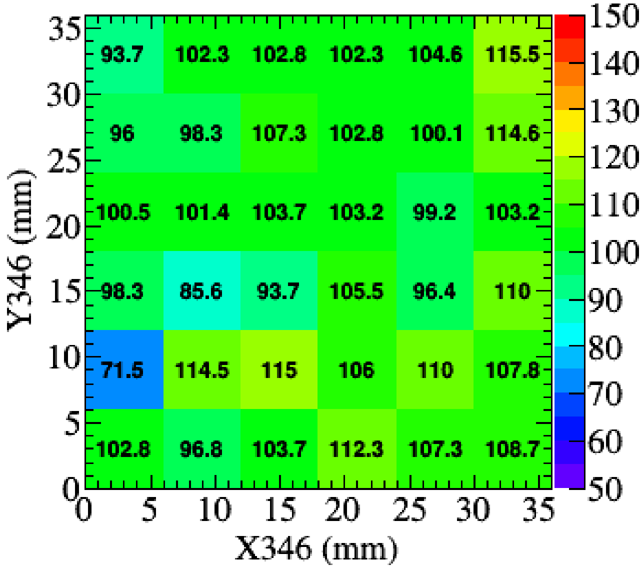
阻性阳极优化：Pad方阻均匀性（模拟）

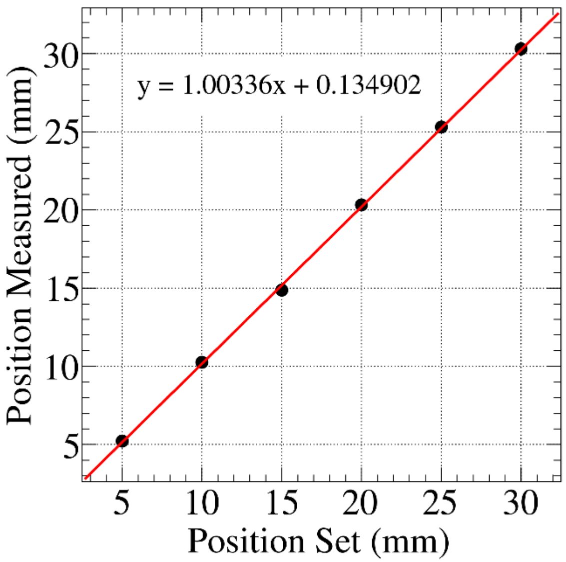


阻性阳极优化：Pad方阻均匀性（实验）



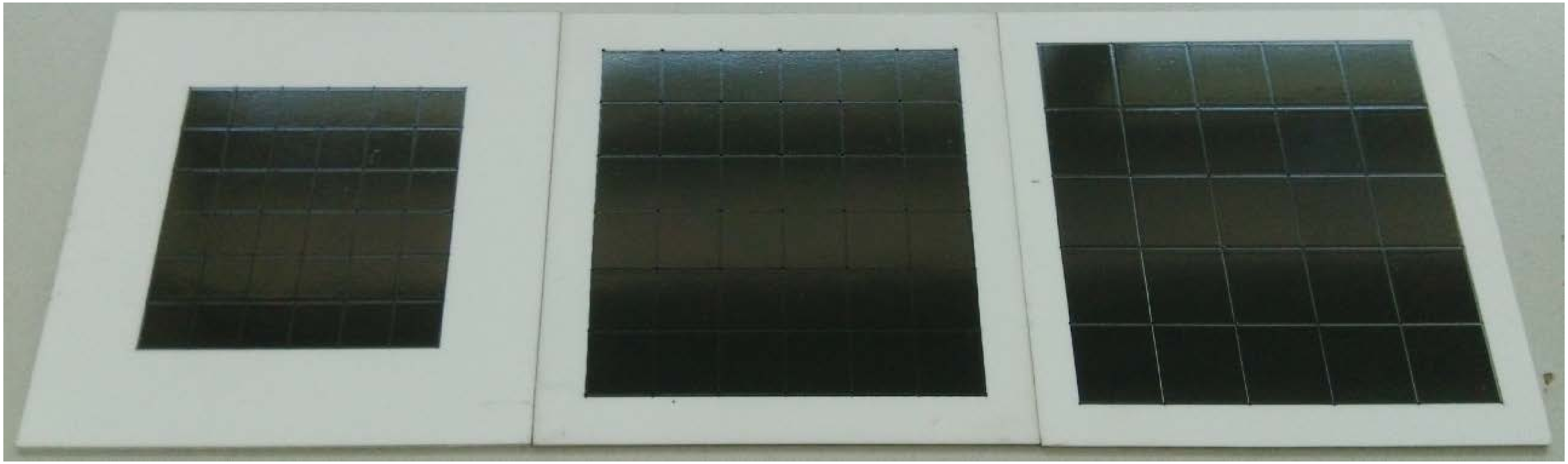
6 mm×6 mm Cell





- 实验结果
  - 除个别Cell外，方阻不均匀性 < 20%
  - 良好的探测器非线性 ~0.34%，表示具有好的成像均匀性
  - 厚膜电阻工艺限制：5%~30%
  - 方阻不均匀性的参考值为： < 20%

阻性阳极优化：Pad尺寸与位置分辨率



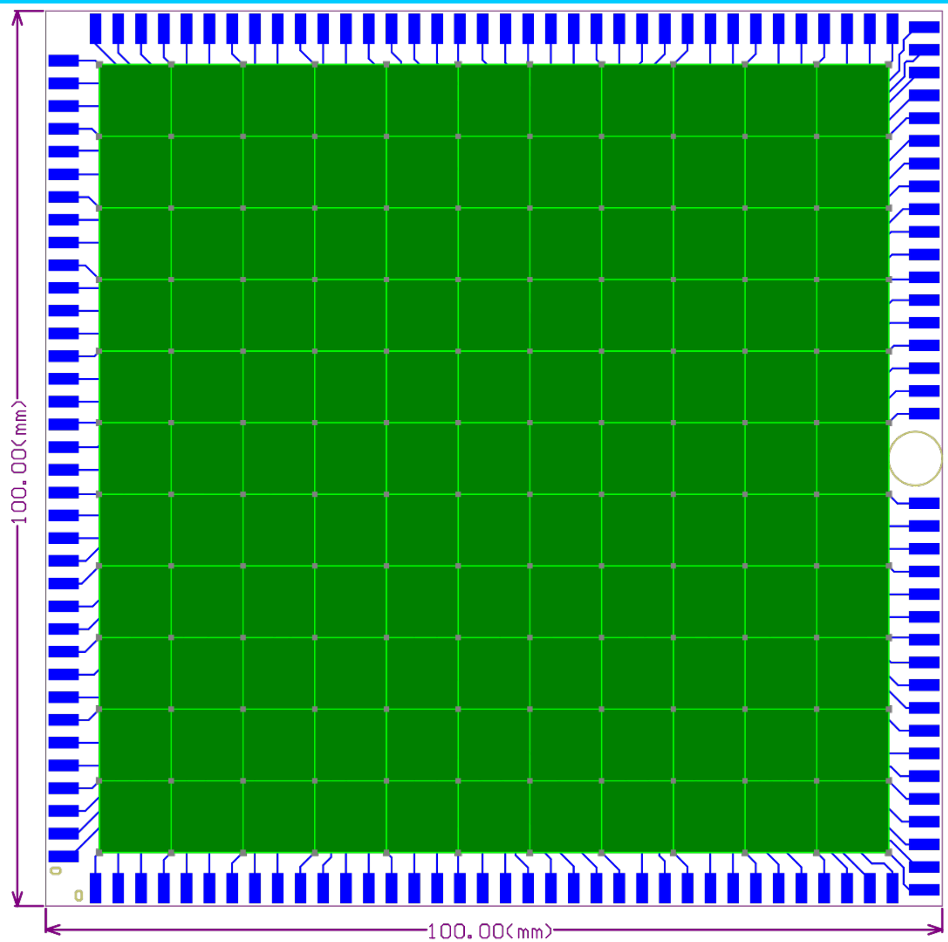
6 mm×6 mm　　8 mm×8 mm　　10 mm×10 mm

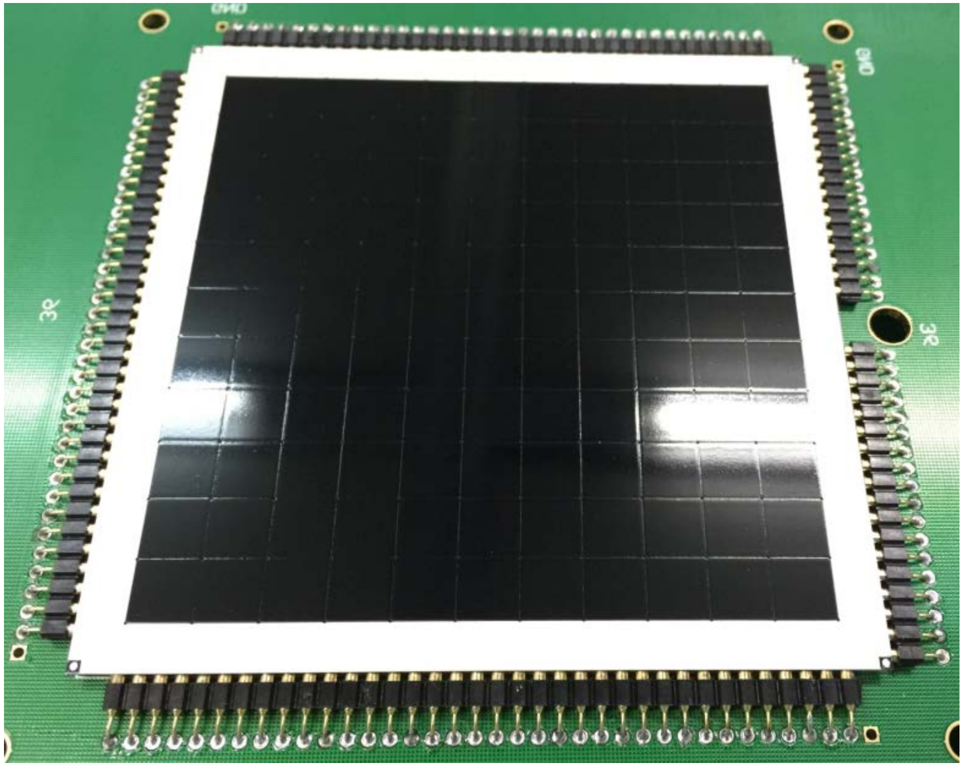
位置分辨率测试结果（双高斯拟合法）

W_{Cell}(mm)	σ_C (μm)	σ_D(μm)
6	103.4	66.7
8	112.2	80.0
10	145.1	109.9

- 实验结果
  - Pad尺寸越小，位置分辨率越好
  - 6 mm × 6 mm 的 Cell $\Rightarrow \sigma < 105$ μm
  - Cell尺寸的确定
    - 位置分辨率需求
    - 电子学通道数
  - Strip宽度的影响

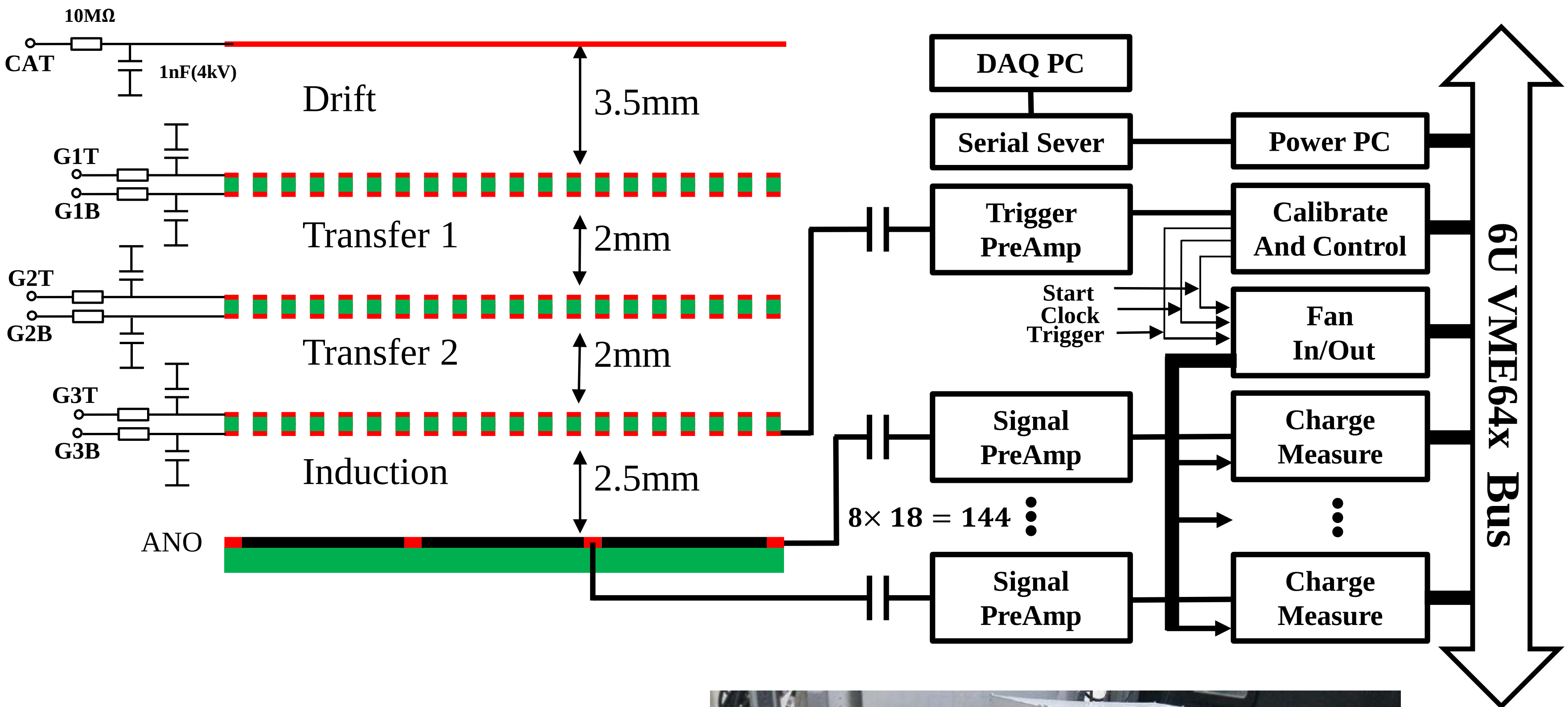
RAGEM样机：阻性阳极读出板



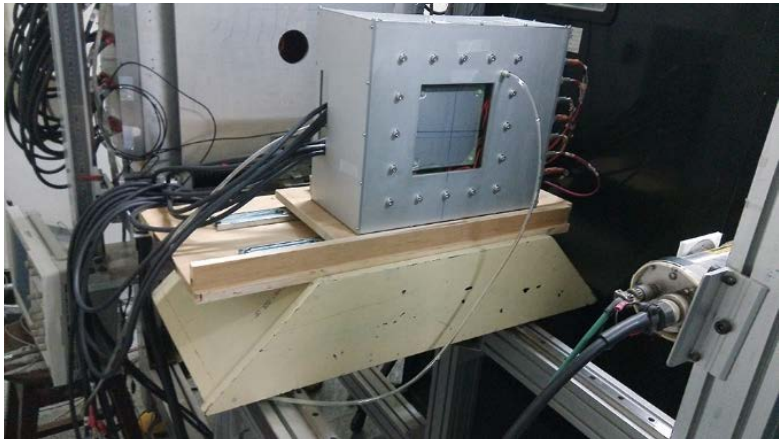


N_{Cell} (1-side)	W_{Pad} (mm)	W_{Strip} (mm)	$R_{\square P}$ (kΩ/□)	$R_{\square S}$ (kΩ/□)	ϕ_{Hole} (mm)	$T_{Ceramic}$ (mm)
11	7.85	0.25	200	1	0.3	1

RAGEM样机：整体设计



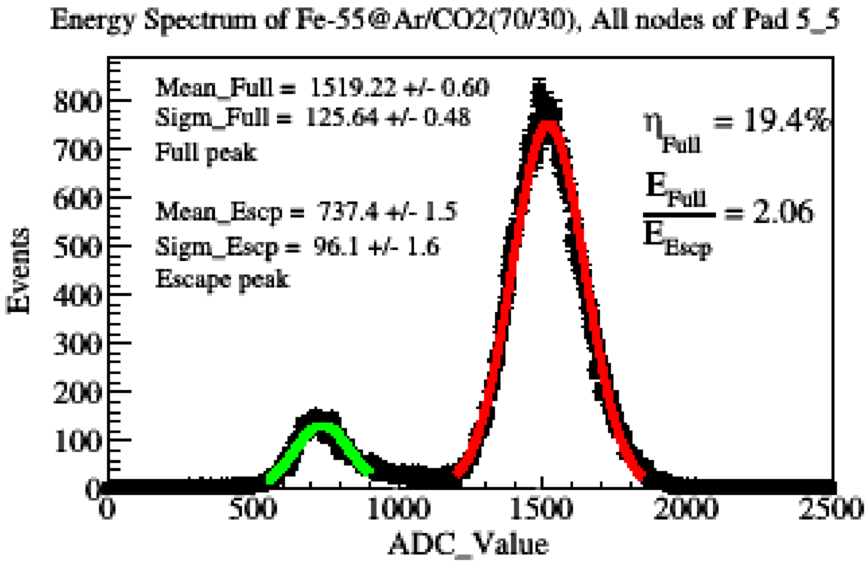
- 铝腔室，流气型探测器，Ar/CO_2(70/30)
  - 探测面积：$100 \times 100\ mm^2$
  - 空间分辨率：$\sigma < 150\ \mu m$ @ 8 mm Cell
  - 总计数率：> 100 kHz
  - 能量范围：5~15 keV

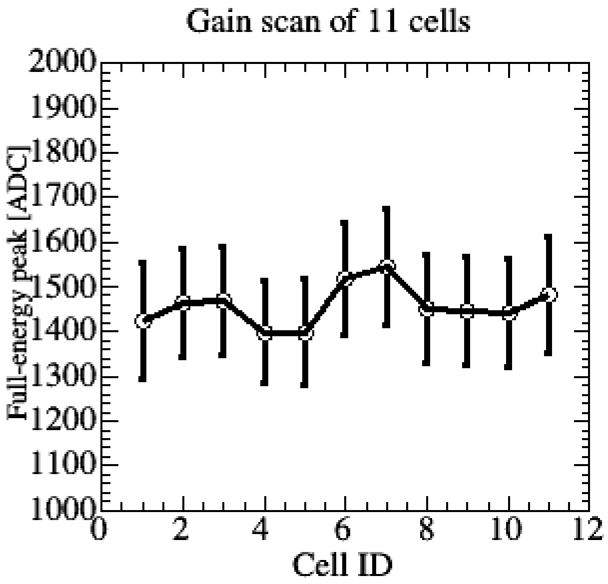


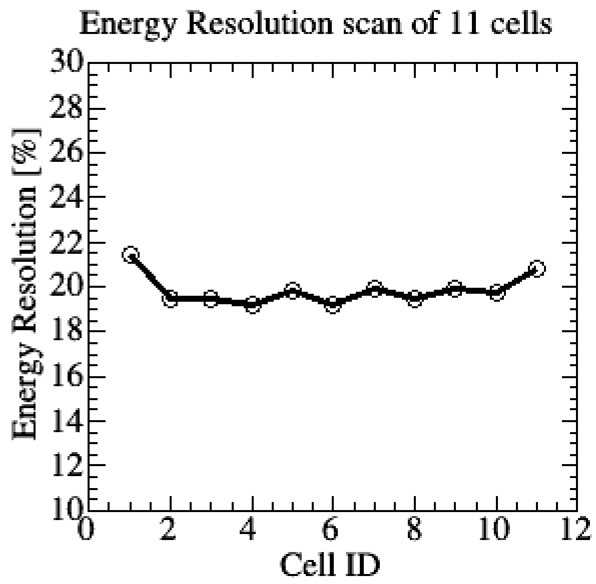
特别感谢祁辉荣老师对实验的支持和帮助

RAGEM样机：能量分辨率与增益均匀性

- $E_{Full} = 1400 \sim 1500$ ADC
  - $\sim 1 \times 10^4$
  - $\sigma < 7\%$ @ 11 Cells
- $\eta = 19.4\%$
  - $\eta \approx 20\%$
- $\frac{E_{Full}}{E_{Escape}} = 2.06\ (1.97)$



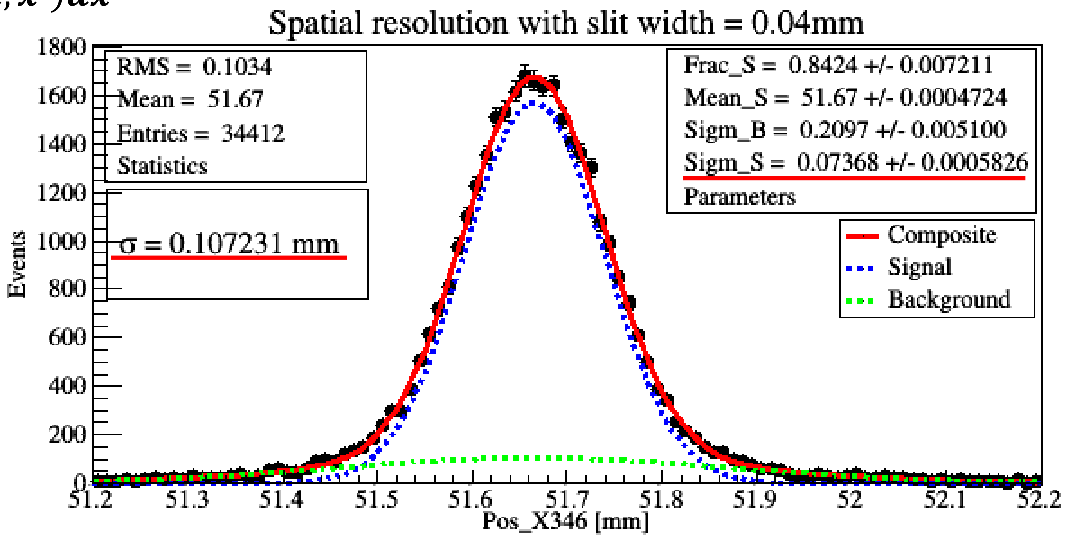


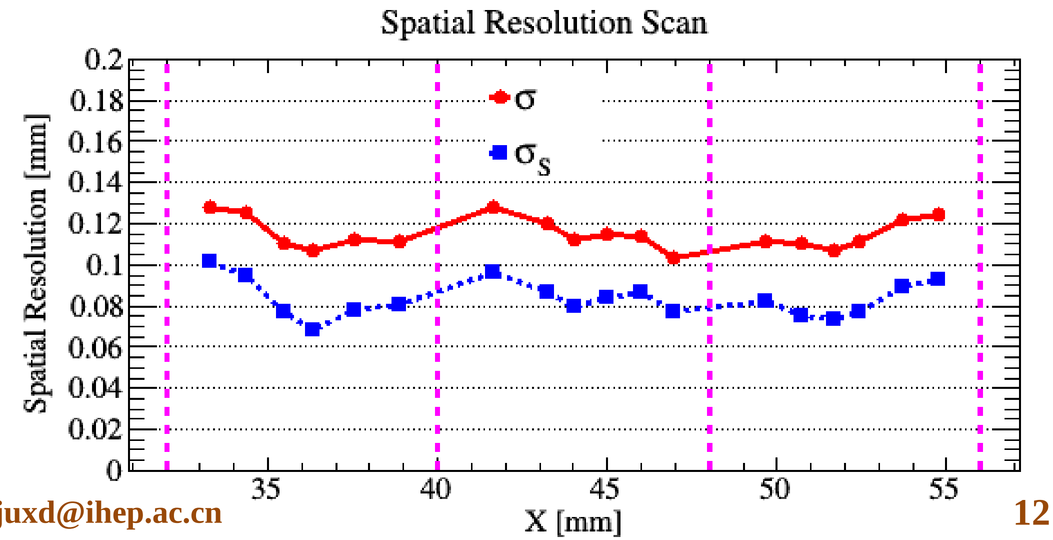


RAGEM样机：探测器位置分辨率

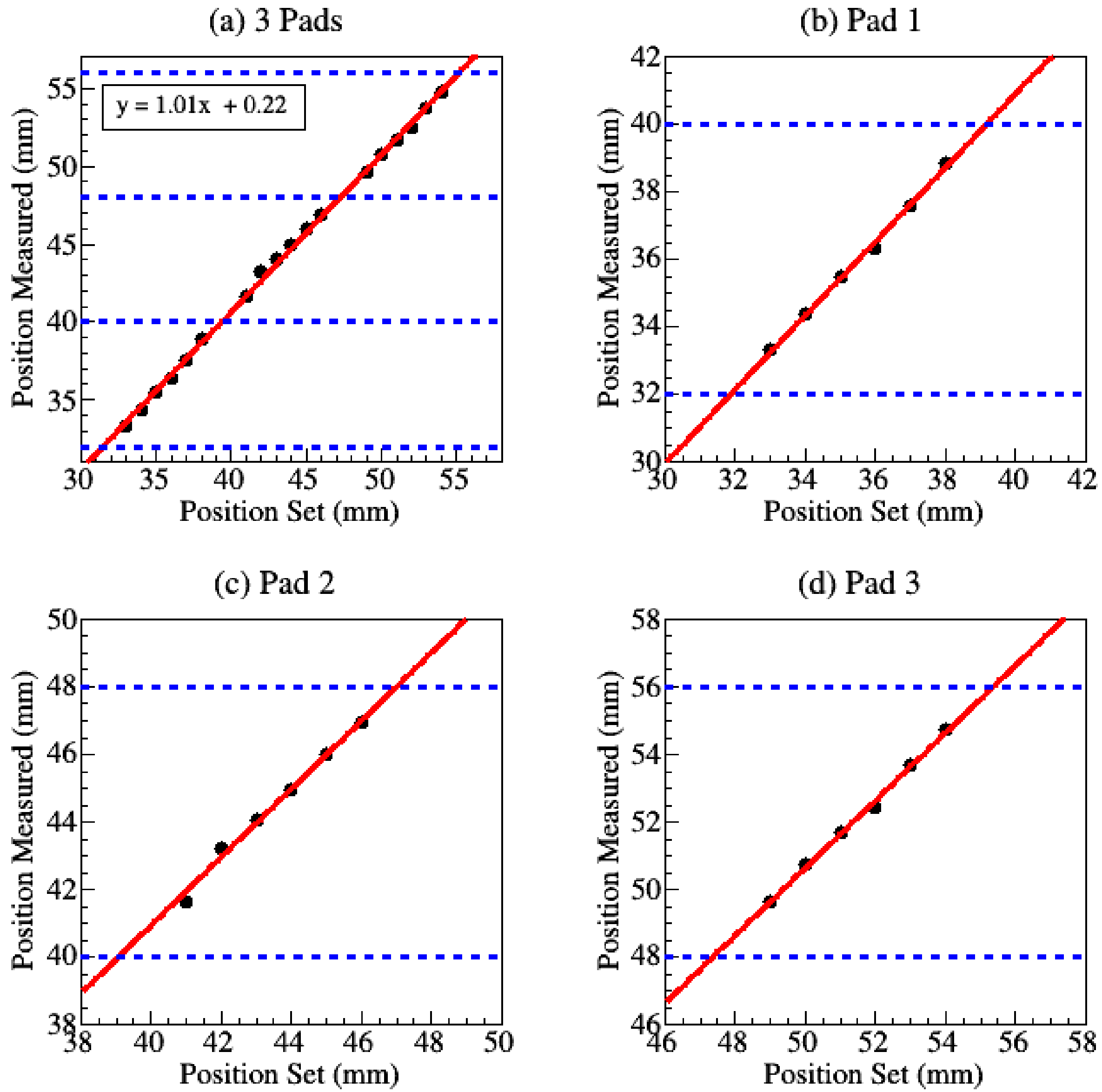
- 基本原理
  - 实验分布$M(x')$表示为真实分布$T(x)$与探测器位置分辨函数$R(x,x')$的卷积
    - $M(x') = T(x) \otimes R(x,x') = \int_{-\infty}^{\infty} T(x)R(x,x')dx$
    - $R(x,x') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}]$
- 双高斯拟合法
  - 假设真实分布为δ分布
  - $M(x') = T(x) \otimes R(x,x')$
    $= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-x_0)R(x,x')dx$
    $= R(x_0,x')$
  - X光机 + 40 μm Slit
  - X光机和狭缝的效应当做本底
  - σ = 107.2 μm @ 8 mm Cell
  - $\bar{\sigma}$ < 120 μm @ 8 mm Cell

$$f(x) = a \cdot g_S(x) + (1-a) \cdot g_B(x)$$
$$g_S(x) = N(\mu_S, \sigma_S)$$
$$g_B(x) = N(\mu_B, \sigma_B)$$
$$\sigma^2 = \int (x-\mu)^2 f(x)dx = a \cdot \sigma_S^2 + (1-a) \cdot \sigma_B^2$$
$$(\mu_B = \mu_S)$$



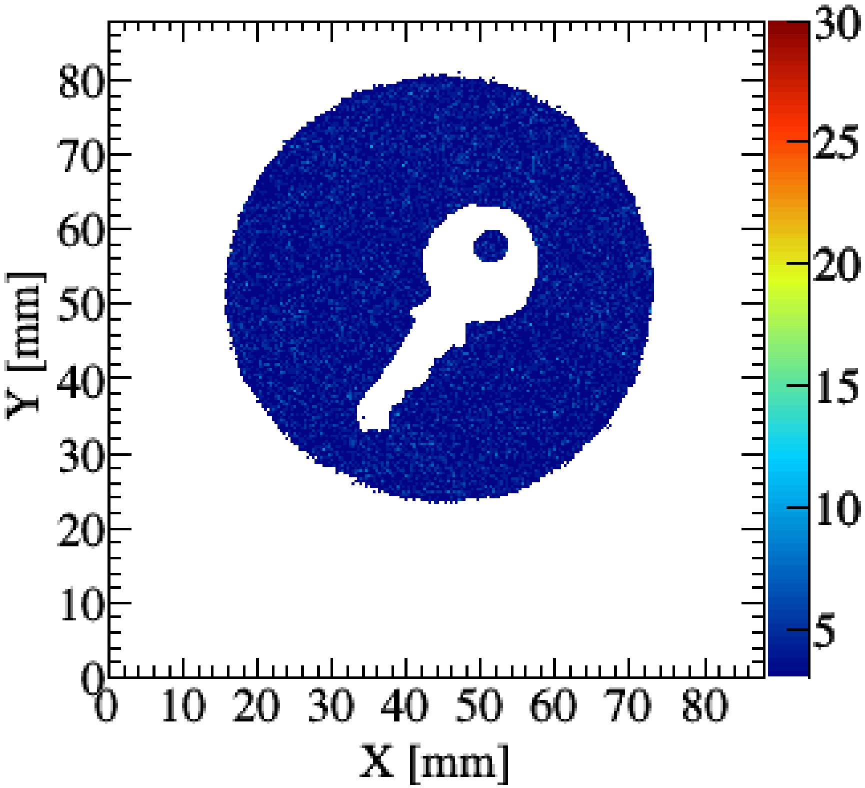


RAGEM样机：探测器位置线性

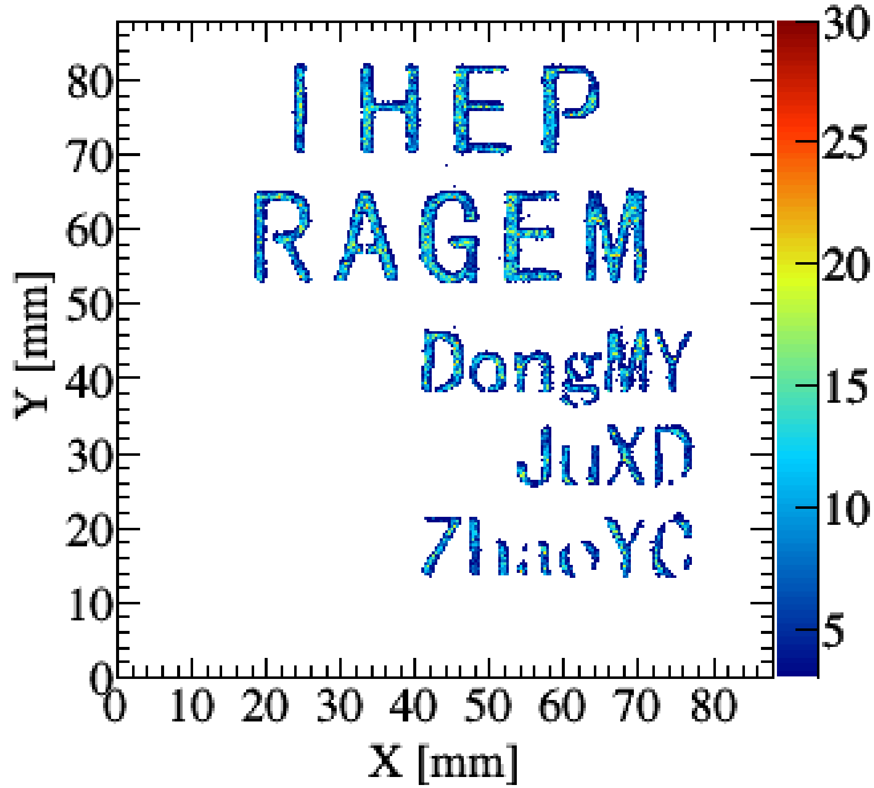


RAGEM样机：探测器二维成像能力

钥匙成像

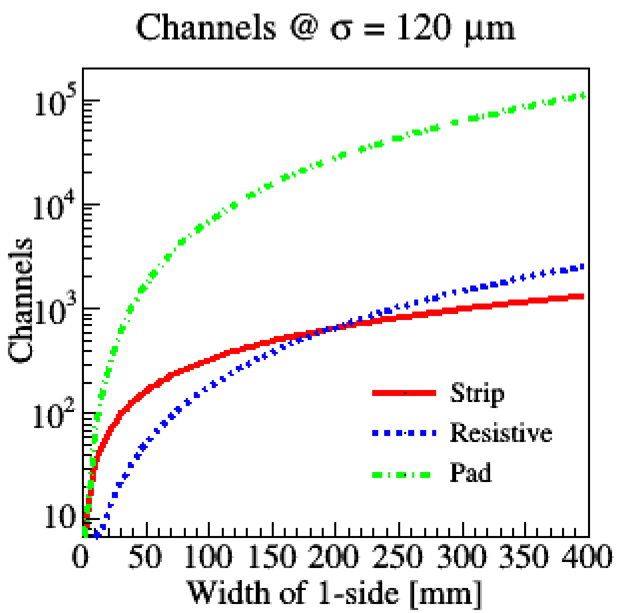


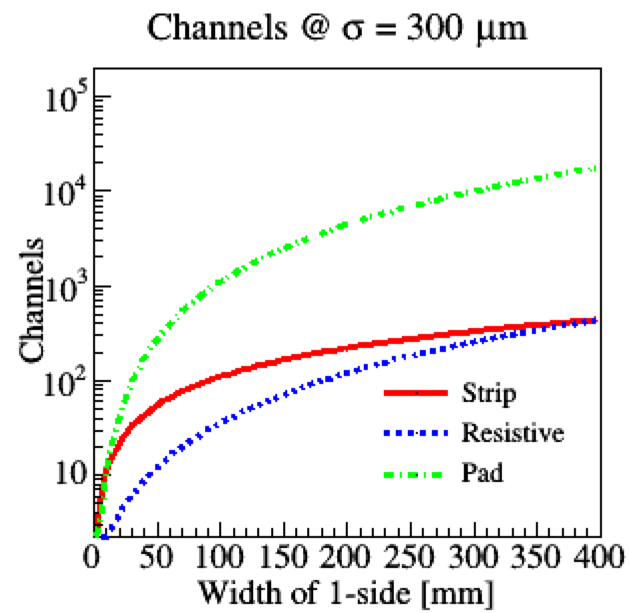
3D打印的字母成像



RAGEM样机：节省电子学能力

- 数字读出
  - $\sigma = \frac{L}{\sqrt{12}}$
- 模拟读出，重心法
  - $\sigma = \frac{L}{a}$
  - $a > \sqrt{12}$
- COMPASS 实验数据
  - Strip
    - σ ~ 80 μm @ 400 μm Pitch
  - Pad
    - σ ~ 100 μm @ 1000 μm Pitch





M. Altunbas et al. Nucl. Instrum. Meth., A490:177 - 203, 2002.
A. Austregisilioet al. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 197:113 - 116, 2009.

- RAGEM 实验数据
  - Resistive Anode
    - σ ~120 μm
      @ 8000 μm Pitch

σ Width Chanls	计算公式	$\sigma = \frac{L}{a}$ 中a值	σ = 120 μm			σ = 300 μm		
			50 (mm)	100 (mm)	200 (mm)	50 (mm)	100 (mm)	200 (mm)
N_{Strip}	$n \times 2$	5	166	334	666	66	134	266
N_{Resist}	$(n+1)^2$	66.7	49	169	676	16	36	121
N_{Pad}	n^2	10	1764	6889	27889	289	1089	4489

总结和展望

- 总结
  - 研究了阻性阳极读出方法用于 **GEM** 探测器的可行性
  - 利用原理探测器研究了阻性阳极板各参数对探测器性能的影响
  - 制作了**100×100 mm^2**的探测器样机，用铁源和X光机对其进行了测试
    - 好的能量分辨率(~20%)和好的增益均匀性 (< 7%)
    - 好的位置分辨率(**~120 μm @ 8 mm Cell**)和好的位置线性 (**< 1.1%**)
    - 良好的二维成像性能
    - 有效节省电子学
      - 当前位置分辨率和灵敏面积下，相较条读出结构，节省约一半电子学
- 展望
  - 为 **RAGEM** 匹配一套集成度较高的电子学，进行计数率测量和同步辐射实验
  - 这种读出方法适用于相似结构的其它探测器，已在厚**GEM**探测器上进行了尝试
  - 进一步增大**Cell**尺寸，用于中子成像 等 (**36 路 @ 20×20 mm^2 Cell @ 100 mm^2 Area**)
  - ……

谢谢

C.W. Gear. USAEC Conf-670301:552, 1969.
T. Doke et al. Nucl. Instrum. Meth., 261(3):605 - 609, 1987.
A. Orthen et al. Nucl. Instrum. Meth., 478(12):200 - 204, 2002.
M. Y. Dong et al. Chin. Phys. C., 37:26002, 2013.
Q. L. Xiu et al. Chin. Phys. C., 37:106002, 2013.
X.D. Ju et al., Chin. Phys.C.,40:86004,2016.

RAGEM样机：探测器计数率分析

Electronics	CAMAC	VME	704GEM
Rate (Hz)	~ 100	$> 3k$	$> 5k$

- 单Cell总计数率
  - 三套电子学系统
    - 目前最高为 5 kHz
  - RC 时间常数
    - $\tau \approx 400$ ns @ $R_P = 200\ \mathrm{K\Omega}/\square$ @ $W_{Cell} = 8$ mm
    - 防止脉冲堆积，间隔三倍时间常数 $\Longrightarrow 4 \times 10^6$ Hz
  - 示波器信号波形和模拟结果
    - 信号上升时间 $\Longrightarrow$ >100 kHz
    - 2 μs 时间窗 $\Longrightarrow$ 500 kHz
- 单位面积内上的计数率
  - 多次击中问题
  - 泊松分布
    - $\mathrm{P(X = k)} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$
    - $\lambda = \varepsilon \cdot \Delta t \cdot s \cdot I_0$
    - 3×3 Cell， $\mathrm{P}(k > 1) = 1.8\%$ @ 100 kHz