

# 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 欧阳群

高能物理研究所  
核探测与核电子学国家重点实验室

# 主要内容

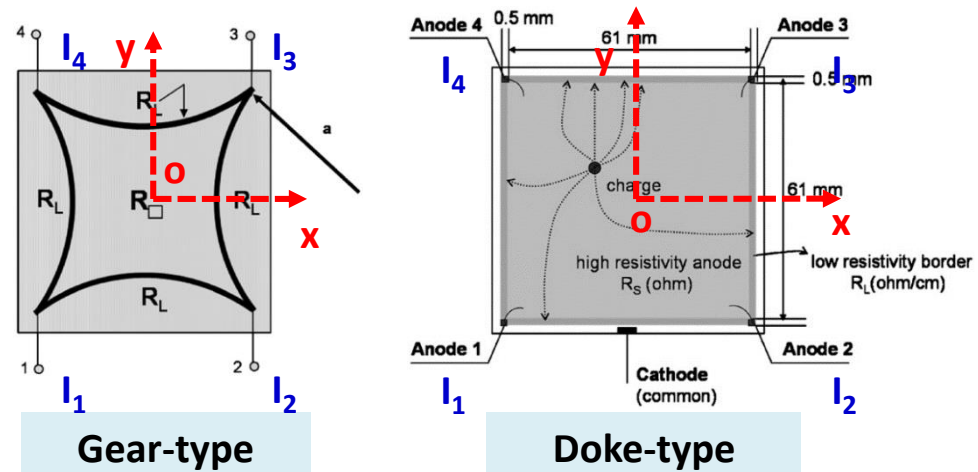
- 二维阻性阳极读出方法介绍
- 阻性阳极读出重建算法研究
- 阻性阳极读出板的优化
- 探测器公共触发系统的研究
- 总结

# 背景

- 微结构气体探测器的特点
  - 高位置分辨、高计数率、抗辐照性能、快时间响应.....
- 高位置分辨 $\leftrightarrow$ 高密度电子学通道
- 电子学方面：高集成度的芯片
- 探测器方面：保持高位置分辨的同时，节约电子学通道，信号读出及处理方法
  - 科大延迟线读出
  - 清华大学楔形阳极读出
  - 科大的编码读出
  - 锯齿读出（Zigzag）
  - 开关电容阵列读出
  - 高能所开展的阻性阳极读出方法研究

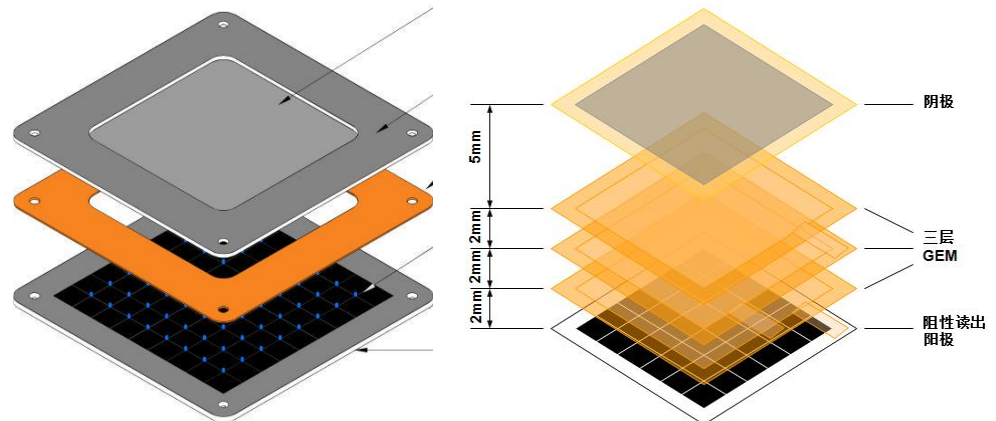
# 阻性阳极读出方法

- 阻性阳极读出方法
  - 位置灵敏硅探测器中广泛应用
    - Gear-type 无枕形失真
    - Doke-type 优化改进
  - 德国Giegen大学Micro-CAT探测器
    - $\sigma = 200 \sim 400 \mu\text{m}$
    - $7 \times 7$  Cells,  $8 \times 8 \text{ mm}^2$
- 我们的工作
  - 2011年起, 原理探测器, 单读出pad ( $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ ), 中心区域位置分辨 $\sigma$ 好于 $150\mu\text{m}$
  - 2014年系统性研究



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(1{2}):200 - 204, 2002.

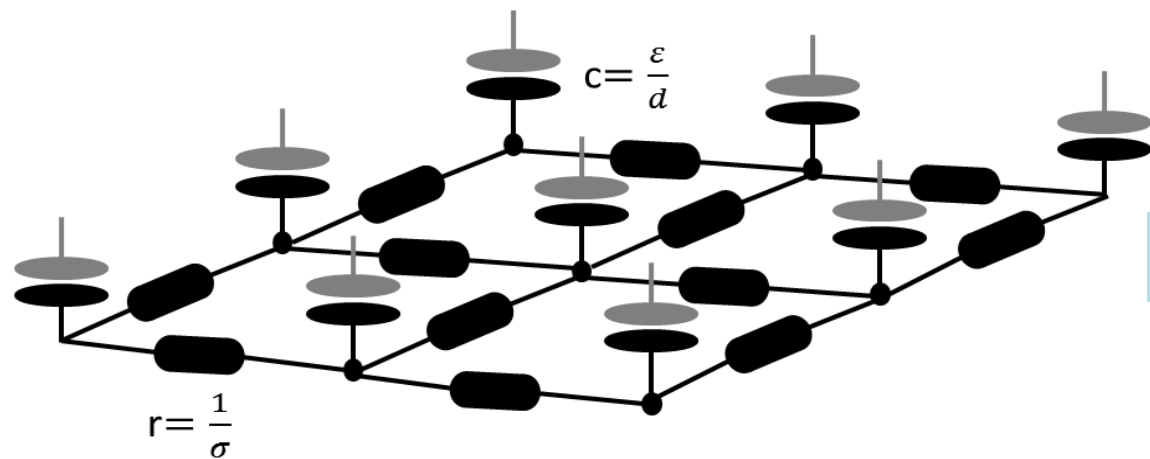
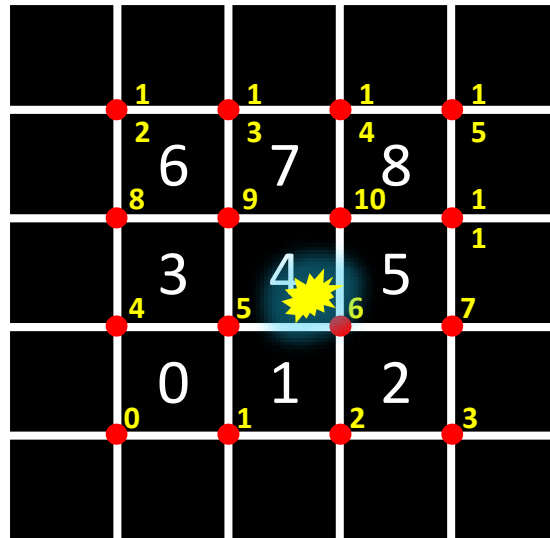
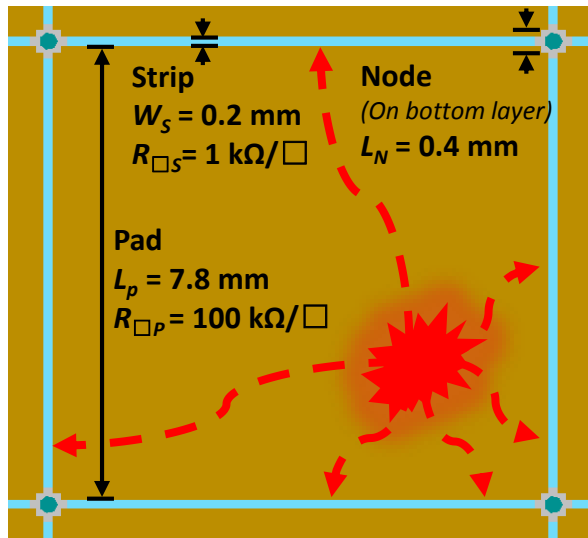
M. Y. Dong et al. Chin. Phys. C., 37:26002, 2013.

# 阻性阳极读出方法研究

- 算法研究
- 阻性阳极读出板优化
- X射线成像探测器的研制
- 微结构气体探测器上的拓展应用
- $3 \times 3$ ,  $6 \times 6$ ,  $11 \times 11$ 阵列,
- Pad尺寸:  
6 mm  $\times$  6mm,  
8mm  $\times$  8mm,  
10mm  $\times$  10mm

版本	厂家	块宽 mm	条宽 mm	块阻 k $\Omega$ /□	条阻 k $\Omega$ /□	备注
V1-8	A	7.8	0.2	1000	1	A第一版, 导线直接连接焊盘, 可以
V2-8	A	7.8	0.2	100	1	改进引出方式, 枕形失真较大, 较好
V3-8	B	7.8	0.2	100	1	B第一版, 高阻覆盖低阻, 不好
V4-8	A	7.8	0.4	100	1	换回A, 未电气连接, 不能用
V5-6	A	5.8	0.4	100	1	不同Pad尺寸, Node击中多, 可以
V5-10	A	9.8	0.4	100	1	不同Pad尺寸, Node击中多, 可以
V6-8	B	7.8	0.4	100	1	换回B, 调整焊盘和条宽, 不太好
V7-8	C	7.8	0.4	100	1	C第一版, 可测方阻, 畸变最严重
V8-8	B	7.85	0.2	150	5	修改Pad尺寸, 不同方阻比, 可以
V8-8	B	7.85	0.2	500	5	修改Pad尺寸, 不同方阻比, 可以
V8-8	B	7.85	0.2	250	5	修改Pad尺寸, 不同方阻比, 可以
V9-8	C	7.85	0.25	100	1	修改Pad尺寸, 未电气连接, 不能用
V10-6	C	5.85	0.25	100	1	改进电气连接, 不同Pad尺寸, 较好
V10-10	C	9.85	0.25	100	1	改进电气连接, 不同Pad尺寸, 较好
V11-8	C	7.85	0.25	200	1	大面积陶瓷板, 增大方阻比, 好
V11-8	C	7.85	0.25	250	1	大面积陶瓷板, 增大方阻比, 好

# 阻性阳极读出方法的原理及数学模型



- 读出板基本结构:
  - 高阻pad
  - 周围环绕的低阻边界
  - 读出节点
- 二维RC网络
- 电荷输运扩散过程可等效为

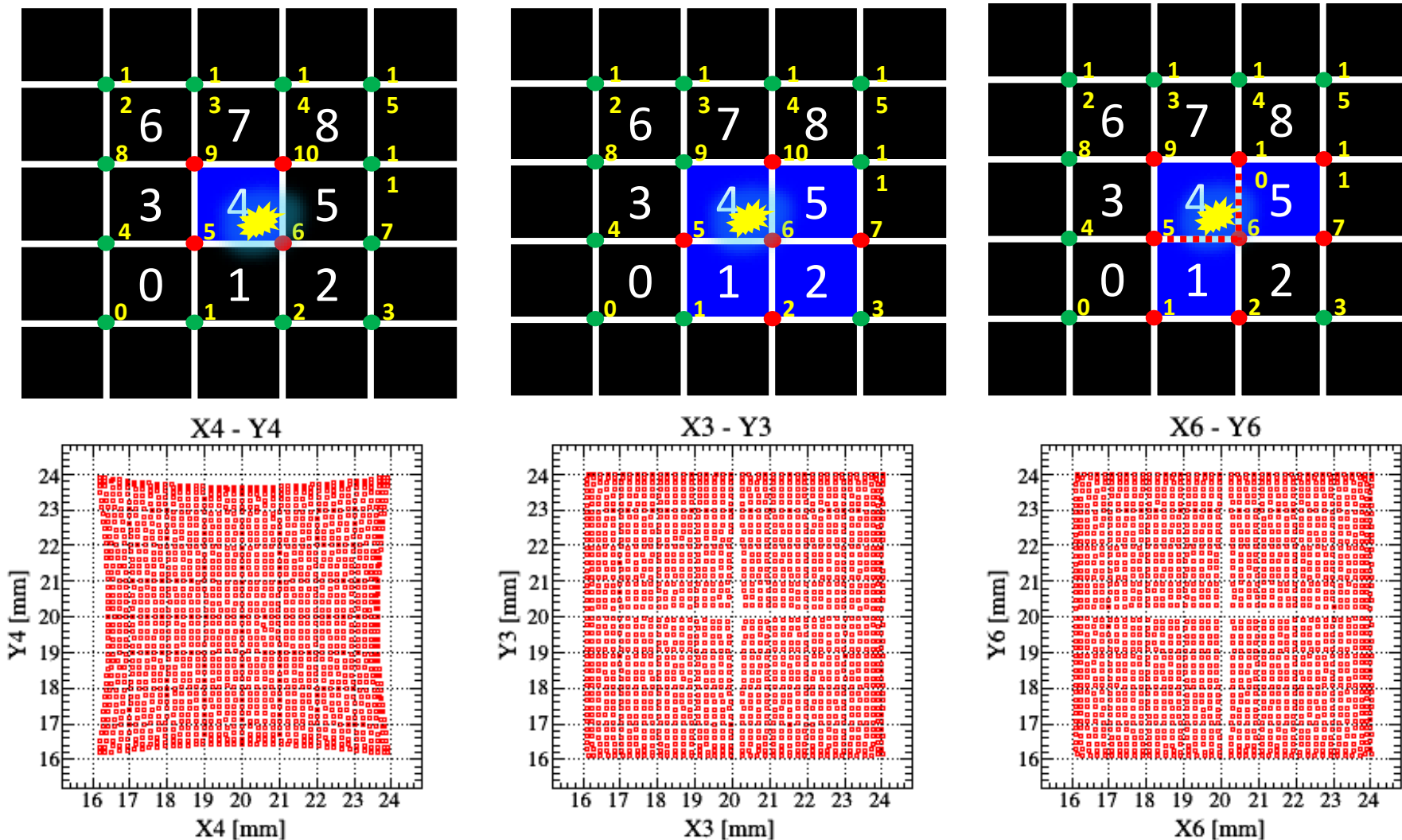
$$c \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial t} - \nabla \cdot (\sigma(x, y) \nabla V(x, y, t)) = I(x, y, t)$$

- 有限差分法

# 重建算法研究

- 本质上为电荷重心法，集中位置不同导致不同节点收集的电荷量不同而重建出位置信息：
  - 4节点重建：电荷扩散到周边相邻pad
  - 3、6节点重建：可以重建出扩散部分电荷
  - 多节点重建 (9、12、16)：所用pad数目较多
  - 模拟查表法：根据插值法, 结合实验数据刻度出不同位置电荷的扩散损失量，计算量大，耗时长

# 阻性阳极读出重建算法研究：3, 4, 6节点重建





# 阻性阳极读出重建算法研究：3、4、6节点加权迭代

## ● 基本原理

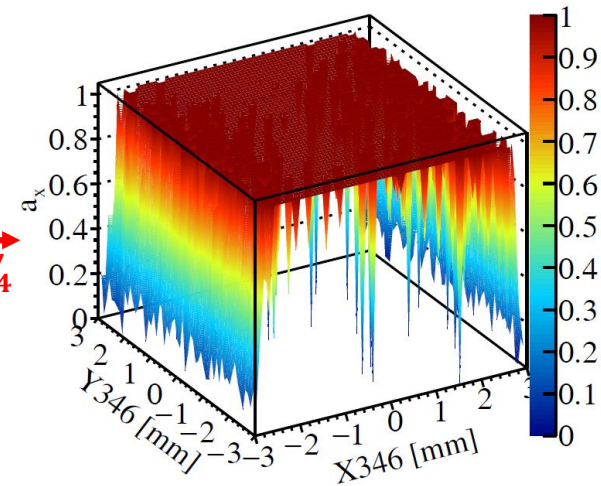
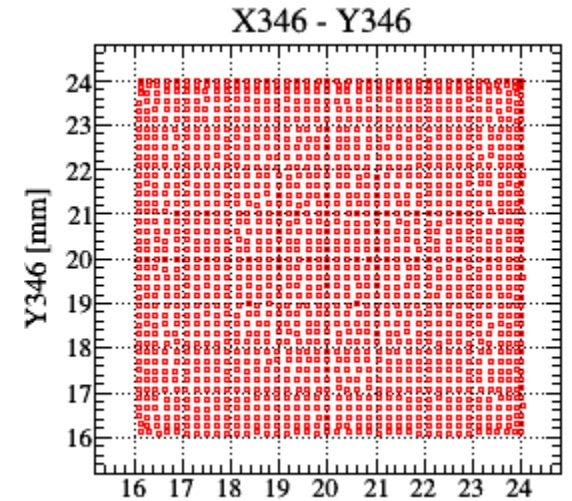
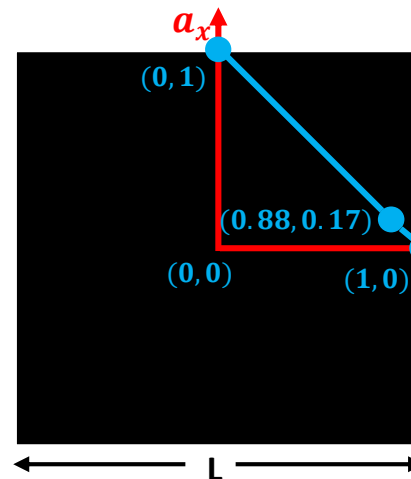
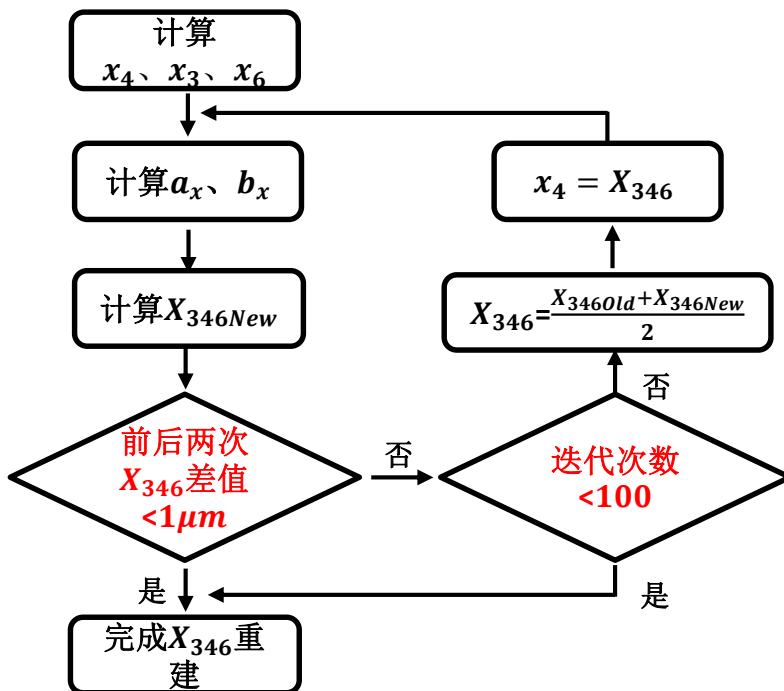
- $X_{346} = a_x X_4 + (1 - a_x)[b_x X_3 + (1 - b_x)X_6]$

## ■ 分区重建

- ◆ 4节点  $\Rightarrow$  Cell中心
- ◆ 3节点  $\Rightarrow$  Node
- ◆ 6节点  $\Rightarrow$  Cell边缘

## ■ 参数 $a_x$ 、 $b_x$ 的确定 $\Rightarrow$ 初值 + 多次迭代

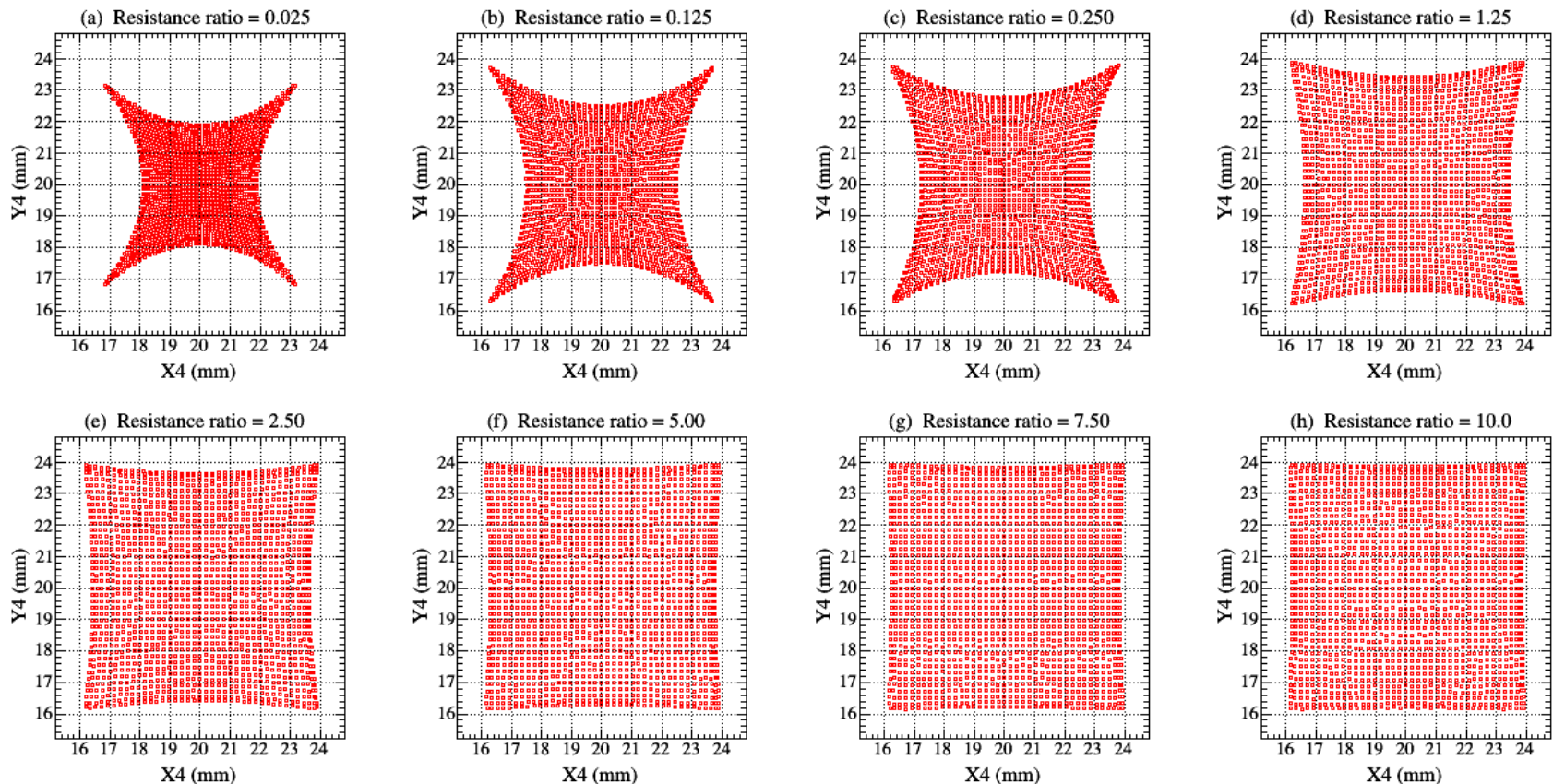
H.Wagner et al. Nucl. Instrum.Meth., A523:287{301, 2004.  
Q. L. Xiu, M. Y. Dong et al. Chin. Phys. C., 37:106002, 2013.



# 阻性阳极读出板的优化

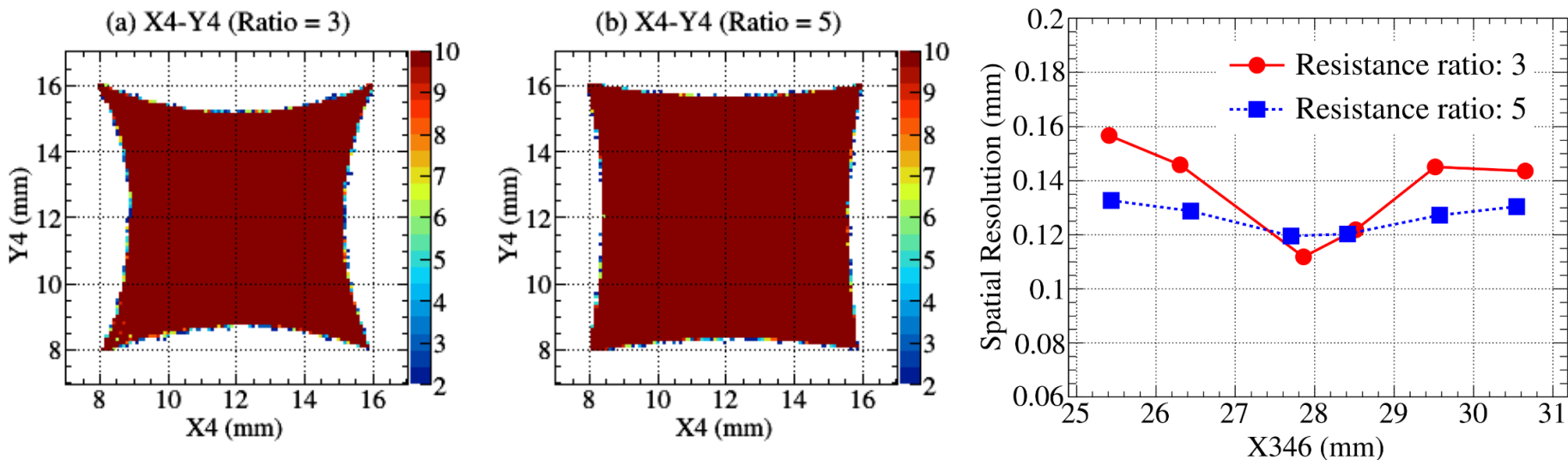
- 阻性阳极板的参数决定探测的性能
  - Pad与其边界strip的电阻比
  - Pad 阻值的均匀性
  - Pad的尺寸
  - Pad的方租
  - Strip的尺寸
  - 读出节点尺寸及 负载

# Pad和Strip阻值比模拟研究



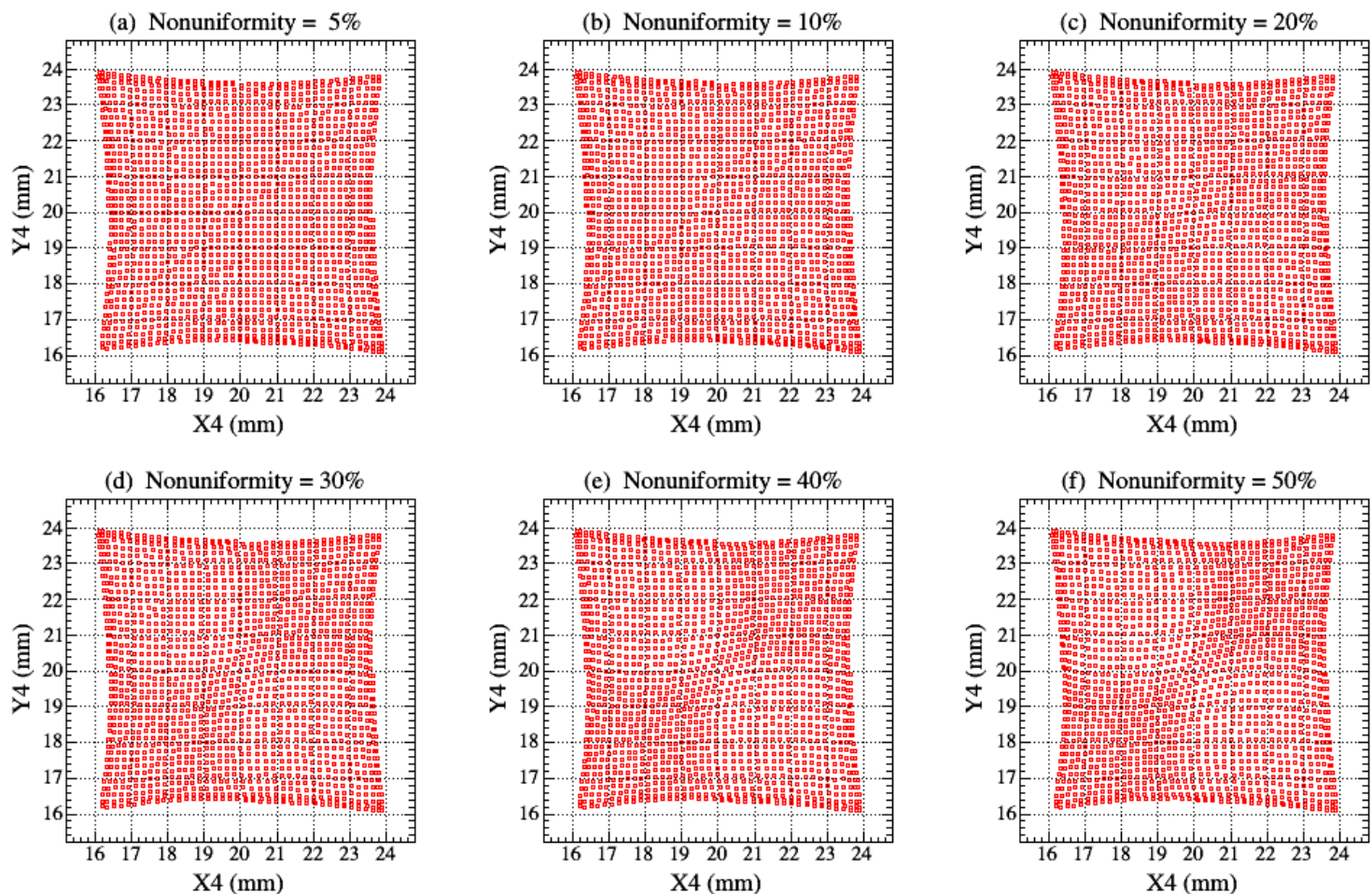
- Pad与strip的阻值比越大，电荷扩散到相邻pad的损失率越小，4节点重建可以看出枕形失真小
- 当该阻值比 $>5$ 时，电荷损失率越为3%，失真已经很小

# Pad和Strip阻值比实验结果



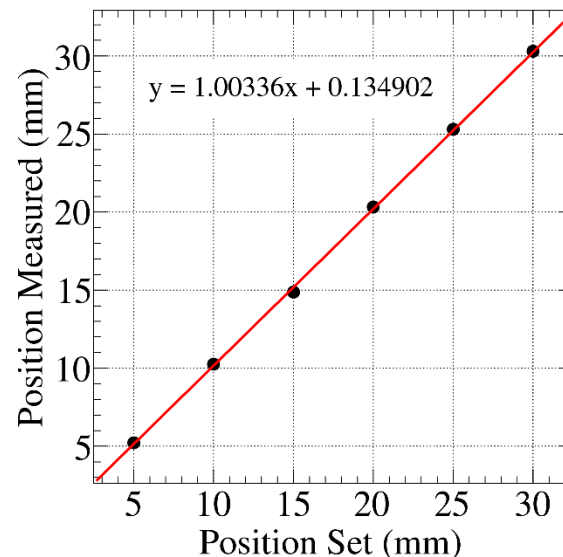
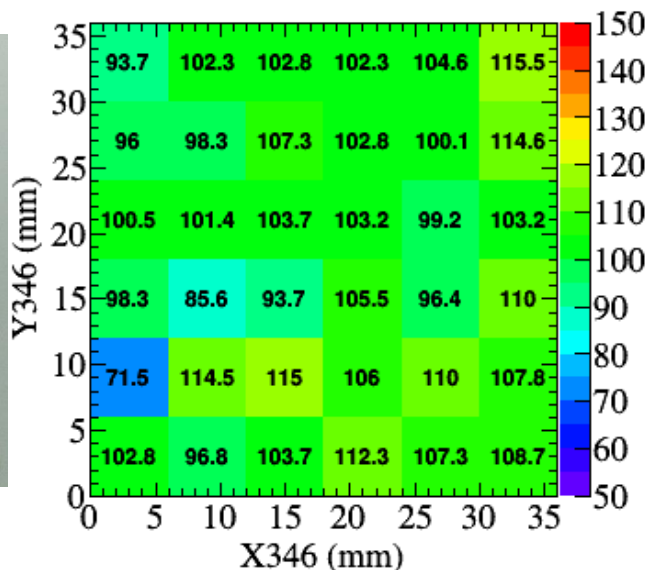
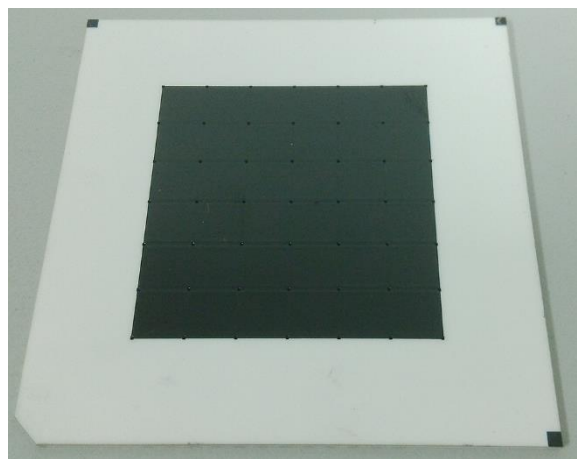
- 测试了阻值比为3和5的两款读出板，4节点重建的结果得到了与模拟一致的结果
- 对探测器的性能上，可以得到阻值比为5的读出板位置分辨率以及位置分辨的均匀性比阻值比为3的读出板有显著提高

# Pad方阻均匀性模拟结果



- 将pad等分4部分，设定不同的方阻值，简单模拟方阻的不均匀性
- 不均匀性大于20%时，重建图像明显扭曲失真

# Pad方阻均匀性实验结果



- 实际加工阻性板的方阻实测值，除个别pad外，均匀性好于20%
- 探测器的位置非线性好于0.34%，代表探测器良好的成像性能
- 目前的厚膜电阻工艺可以将方阻不均匀性控制在20%之内，甚至更好

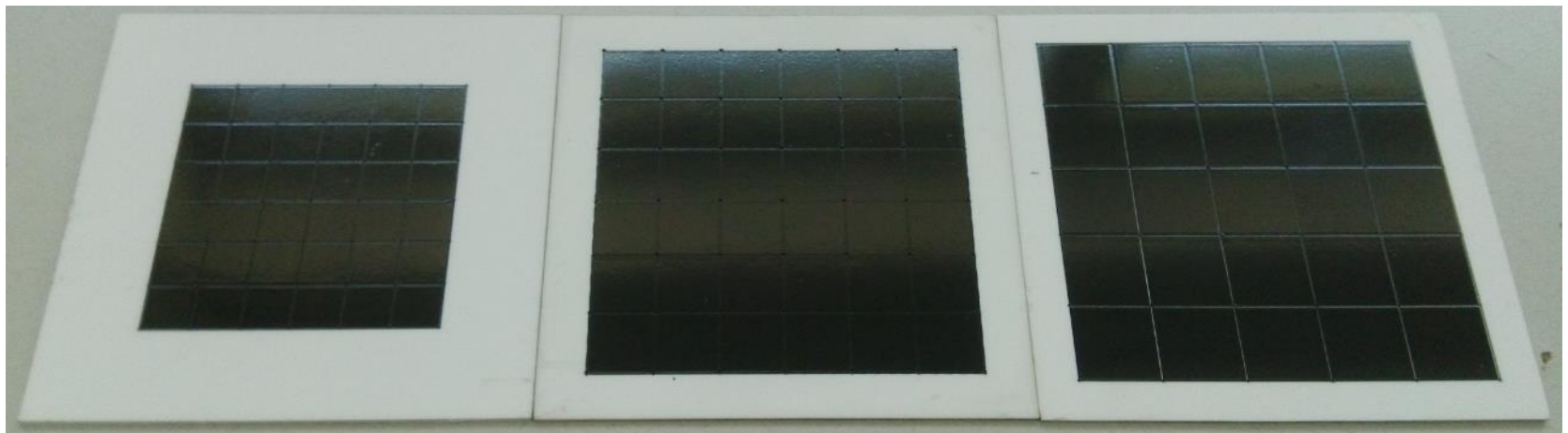
# 高阻Pad的尺寸

- Pad的尺寸直接决定探测器的位置分辨
- 6mm × 6mm的pad可以得到约67 $\mu\text{m}$ 的位置分辨
- 小尺寸pad意味着电子学通道的增多, 需根据实际需求选择

位置分辨率测试结果 (双高斯拟合法)

$W_{Cell}(\text{mm})$	$\sigma_C (\mu\text{m})$	$\sigma_D (\mu\text{m})$
6	103.4	66.7
8	112.2	80.0
10	145.1	109.9

X.D. JU, M. Y. Dong et al. Chin. Phys. C., 086004, 2016

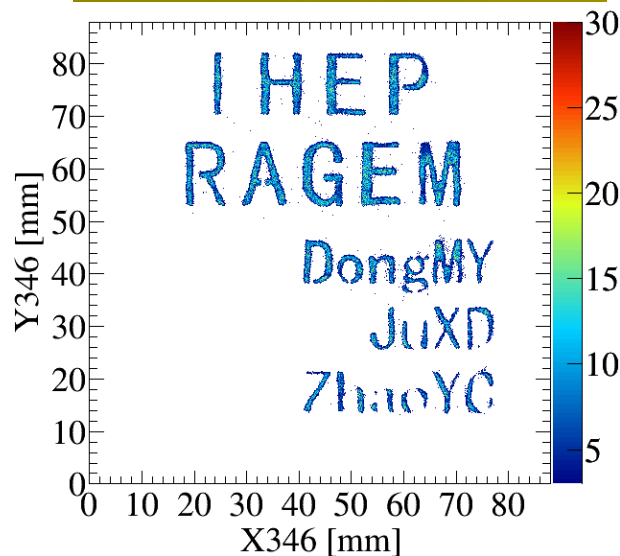
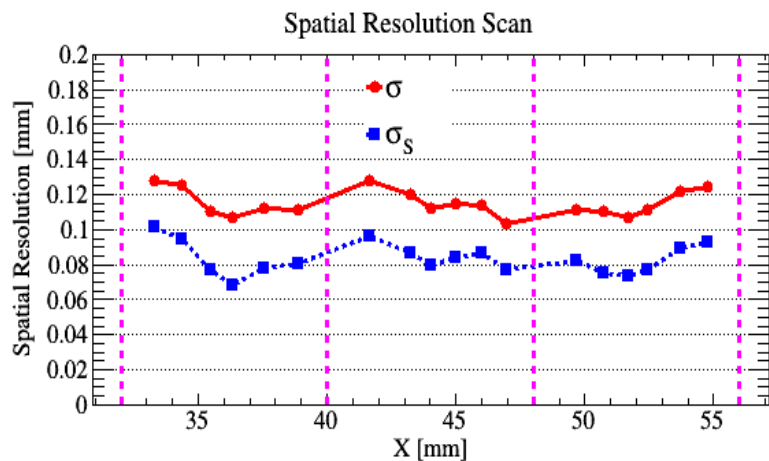
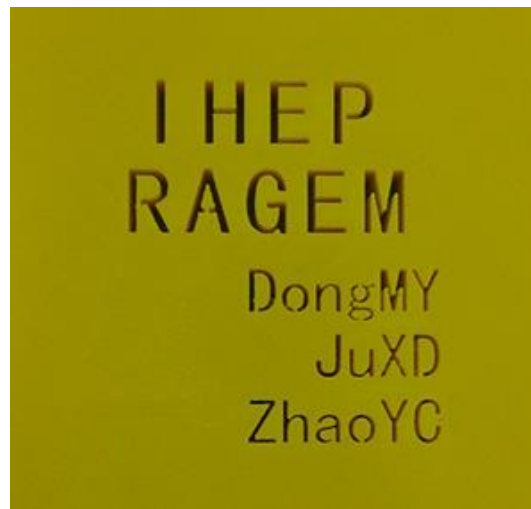
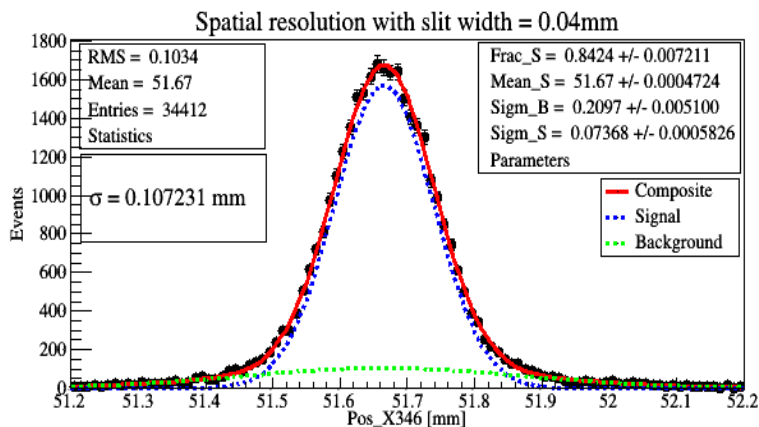


6 mm × 6 mm

8 mm × 8 mm

10 mm × 10 mm

# 100mm × 100mm 探测器



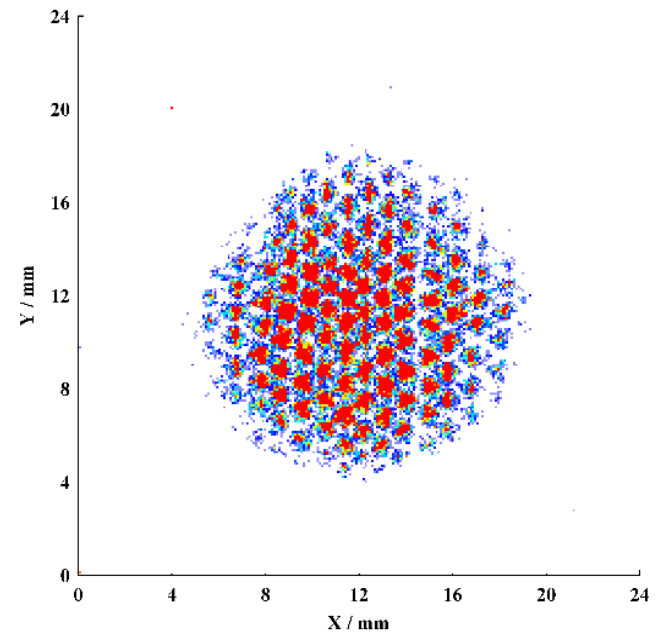
3D打印的  
字母成像：  
字母宽度，  
最大为  
1.4mm，最  
小为0.6mm

- 基于研究结果，研制了100mm × 100mm探测器，Pad尺寸8mm × 8 mm
- 详细内容参考鞠旭东报告



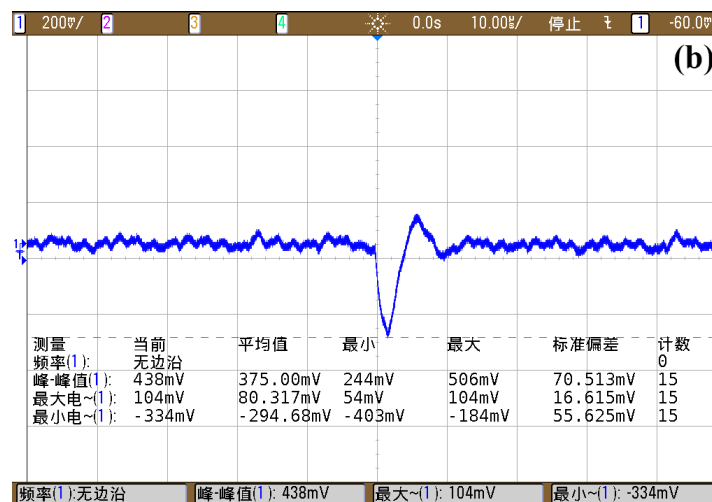
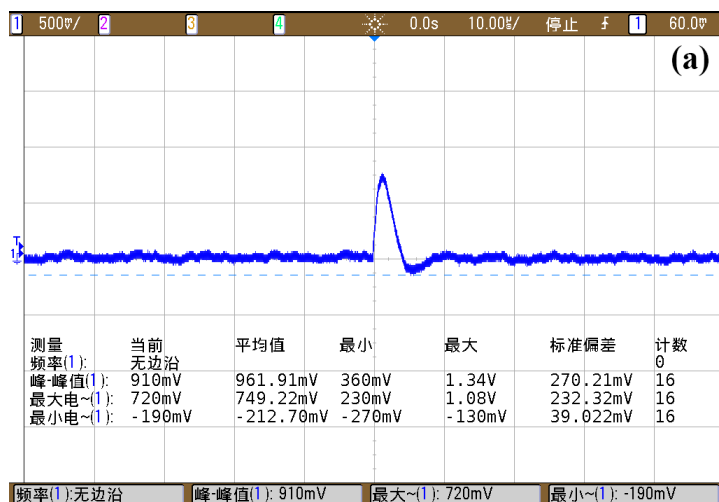
# 厚GEM探测器上的尝试及其他应用

- 谢宇广提供的厚GEM膜
- 单层厚GEM膜，放射源初步测试
- 需进一步分析和研究



# 公共触发信号研究

- 常用的触发方式有自触发和公共触发，公共触发利用GEM3下表面的信号，可以降低电子学的要求，降低探测器研制成本
- 测试中发现不仅有正触发信号,还有负触发信号



# 产生正负触发信号条件分析

- Ramo定理：两个有限平板间运动电荷在读出电极上产生的感应电流为

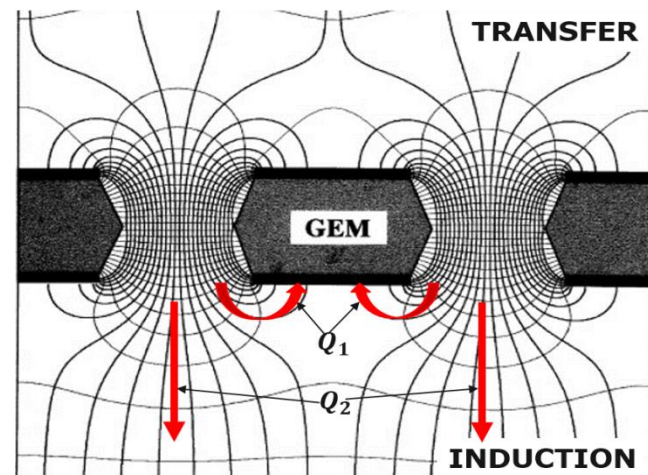
$$i = qvE(x) = qv/d$$

$q$ 为运动电荷的电荷量； $v$ 为其瞬时速度； $E(x)$ 为沿其速度方向的权重电场强度； $d$ 为两平板间距

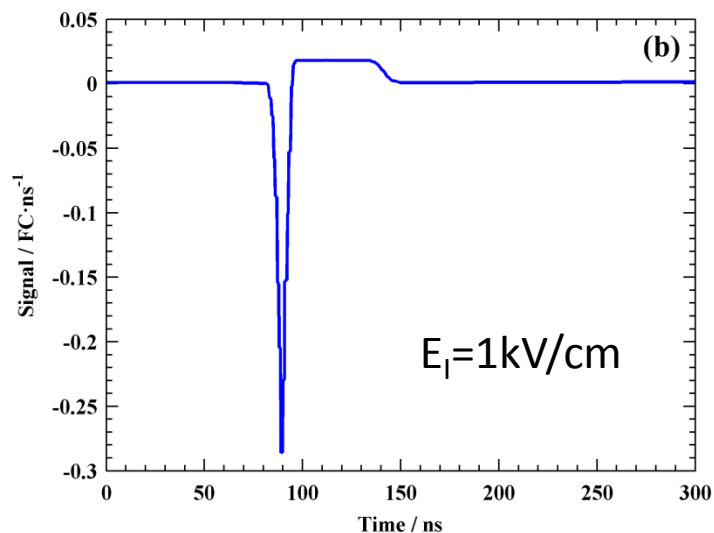
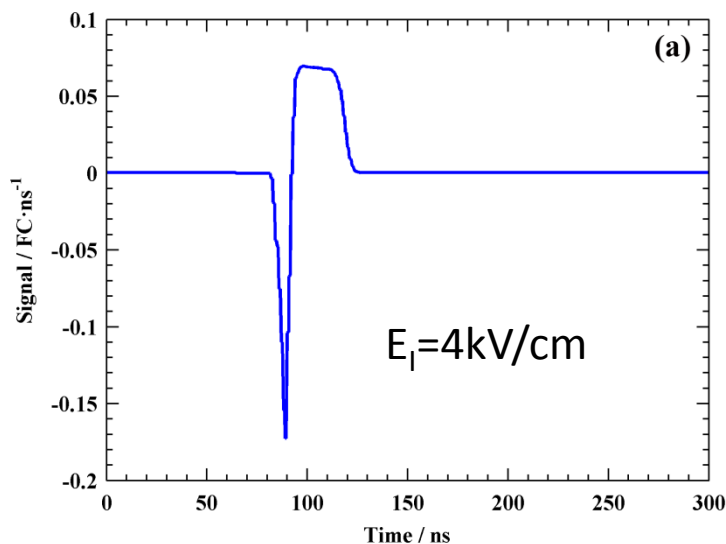
- $Q_1$ 与G3D距离为 $x_1$ ，速度为 $v_1(x_1)$ ，其在G3D上感应出信号为 $i_N$ ； $Q_2$ 与G3D距离为 $x_2$ ，速度为 $v_2(x_2)$ ，其在G3D上感应出信号为 $i_p$ ；则探测器G3D上的信号为这两部分信号的叠加：

$$i = i_N + i_p = [Q_2 \cdot v_2(x_2) - Q_1 \cdot v_1(x_1)]/d$$

- $Q_1 \cdot v_1(x_1)$ 和 $Q_2 \cdot v_2(x_2)$ 大小决定触发信号极性
- $Q_1$ 和 $Q_2$ 由GEM3的电子出孔率，也即感应的场强 $E_1$ 决定

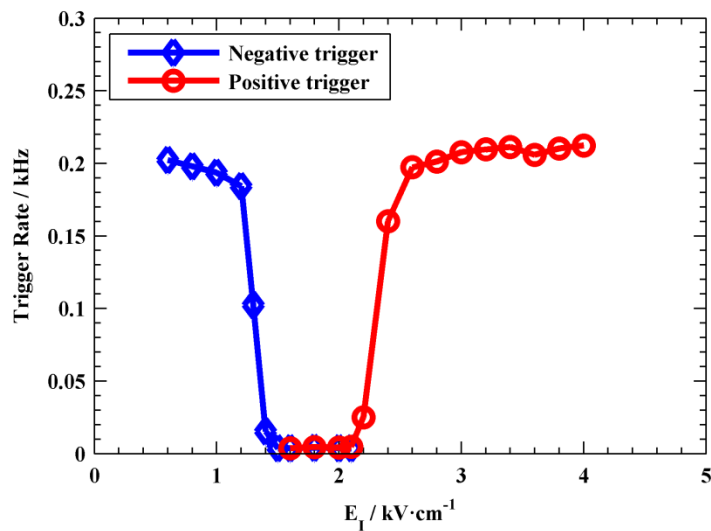


# garfield模拟研究

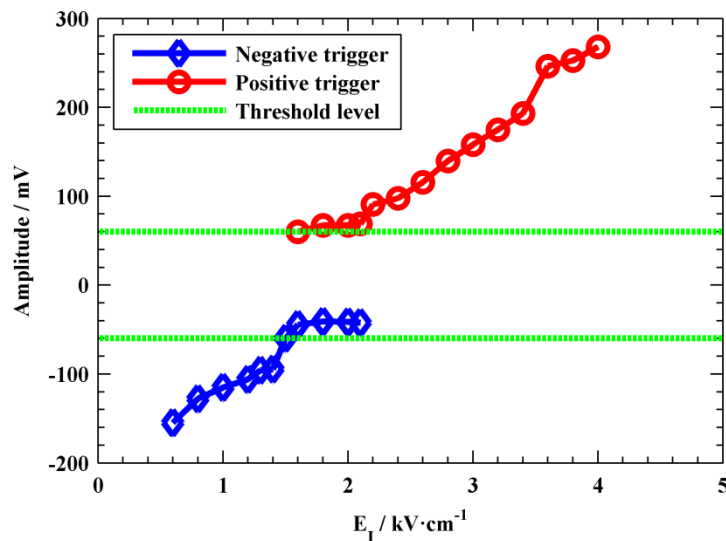


- G3D上的感应信号由正、负两部分组成，分别对应 $Q_2$ 和 $Q_1$ 的感应信号，信号的幅度与感应区场强 $E_1$ 相关
- $Q_1$ 的感应信号为快脉冲信号， $Q_2$ 的感应信号随着 $Q_2$ 漂移速度趋于稳定而变为一个电平，直至其被收集

# 感应器场强对触发信号的影响



触发率随 $E_1$ 的变化



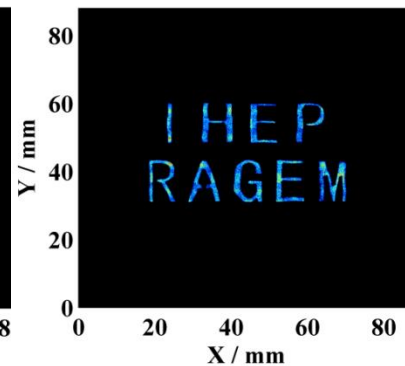
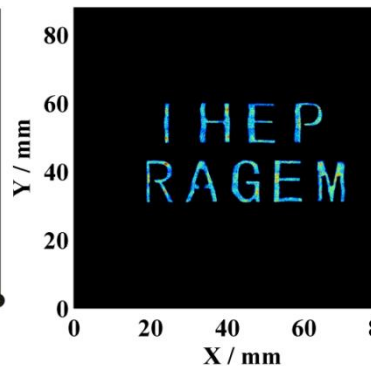
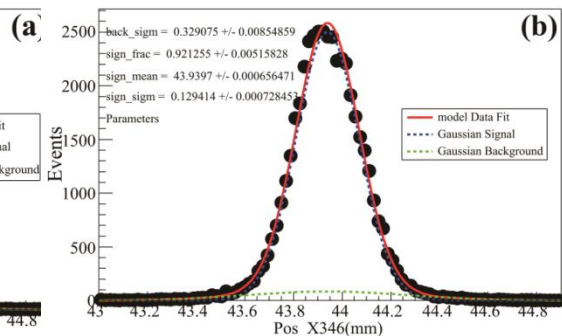
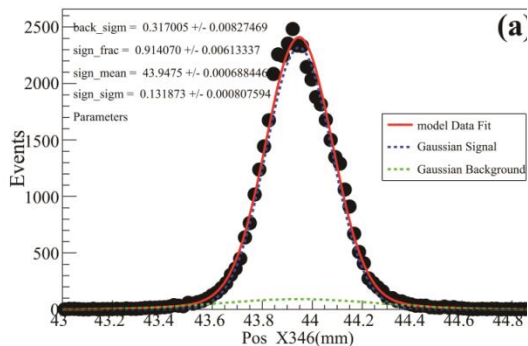
触发信号幅度随 $E_1$ 的变化

- 当 $0.6\text{kV/cm} < E_1 < 1.4\text{kV/cm}$ 时, G3D可提供负极性触发信号
- 当 $1.5\text{kV/cm} \leq E_1 \leq 2.1\text{kV/cm}$ 时, 信号小于触发阈值, 不能提供有效的触发
- 当 $E_1 > 2.2\text{kV/cm}$ 后, 触发信号变为正信号, 且幅度随 $E_1$ 的增大而增大

# 正负触发对探测器性能的影响

## 探测器工作高压设置

电极	CAT	G1U	G1D	G2U	G2D	G3U	G3D
负触发工作高压/ V	-2620	-2270	-1890	-1490	-1120	-620	-250
正触发工作高压/ V	-3370	-3020	-2640	-2240	-1870	-1370	-1000



- 正、负两种触发高压下好事例率分别为96.02%和95.32%
- 正、负两种触发高压下探测器的位置分辨分别为131 $\mu\text{m}$ 和129 $\mu\text{m}$ ,
- 正、负公共触发配置高压下的成像效果, 两者之间看不出显著的区别

# 总结

- 模拟和实验研究了微结气体探测器的阻性阳极读出方法，采用346节点加权迭代重建可以得到较好的重建效果
- 研究了阻性阳极参数对探测器性能的影响，理想的参数为：pad与strip的电阻比大于5%，pad方阻不均匀性好于20%，pad尺寸应根据需求设计
- 完成100mm×100mm探测器的研制及测试，整体位置分辨平均值好于100 $\mu$ m，具有良好的成像性能
- 研究了探测器公共触发信号，为GEM探测器采用不同的公共触发高压设置提供参考

*Thanks for you attention !*