

# PandaX-III 实验高气压TPC读出的低本底高分辨 Micromegas探测器研制与升级



报告人：彭云志 张志永



第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会 2024



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 目录



**I**

**PandaX-III 实验**

**II**

**热压接方法**

**III**

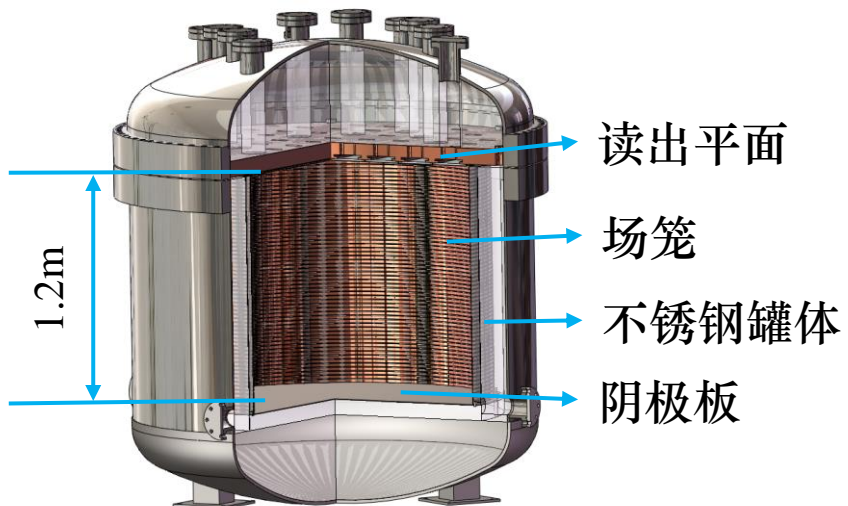
**Micromegas 的制作和性能测试**

**IV**

**Micromegas 的批量制作和质量控制**

**V**

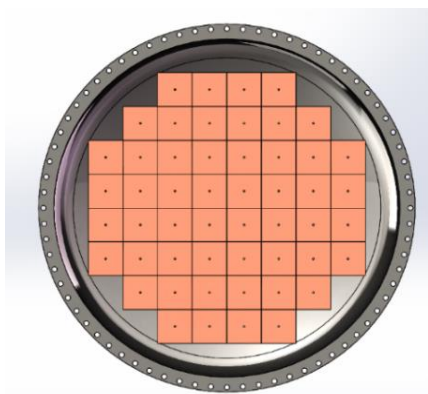
**丝网印刷方法**



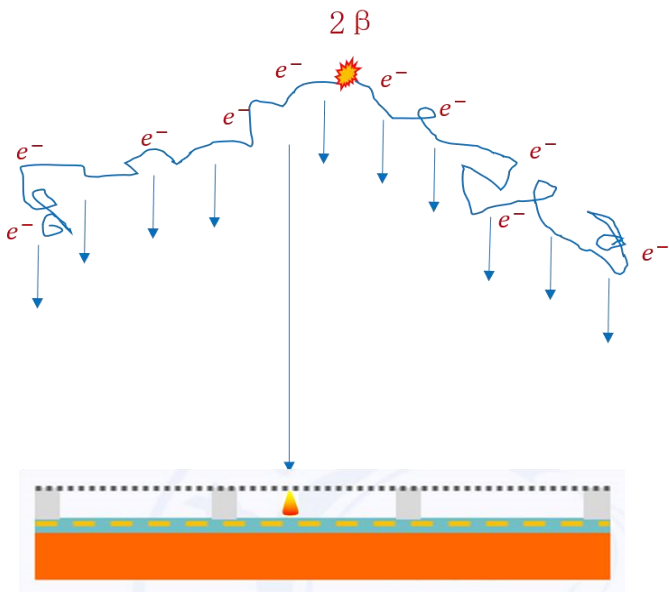
未来即将进驻锦屏地下实验室 (CJPL-II) 的PandaX-III 实验使用高压  
时间投影室 (TPC) 搜寻 $^{136}\text{Xe}$ 的无中微子双贝塔衰变 (NLDBD)

### 读出平面的需求:

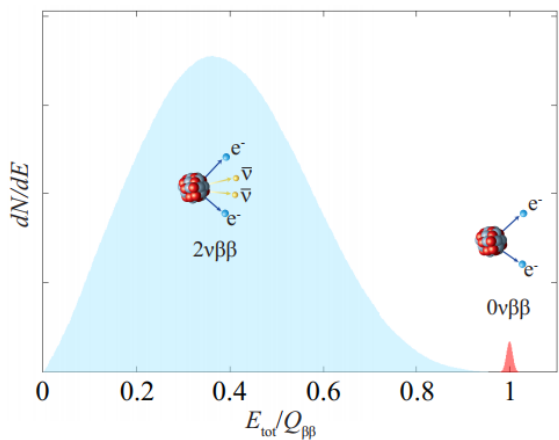
- 3% 能量分辨率@ 2.459 MeV
- 低放射性
- 稳定高增益 ~500@ 10 bar 以确保足够高的信噪比
- 长时间稳定运行@ 10 bar



组成读出平面的  
52块Micromegas阵列



0νββ事例探测过程



双贝塔衰变与无中微子双贝塔衰变总能谱

## 影响能量分辨率的因素

- 初始电子数目
- 漂移过程中的电子损失
- 电子透过率（穿过丝网）
- 雪崩过程本身的随机涨落
- 雪崩气隙的不均匀

雪崩气隙的不均匀



雪崩增益的不均匀

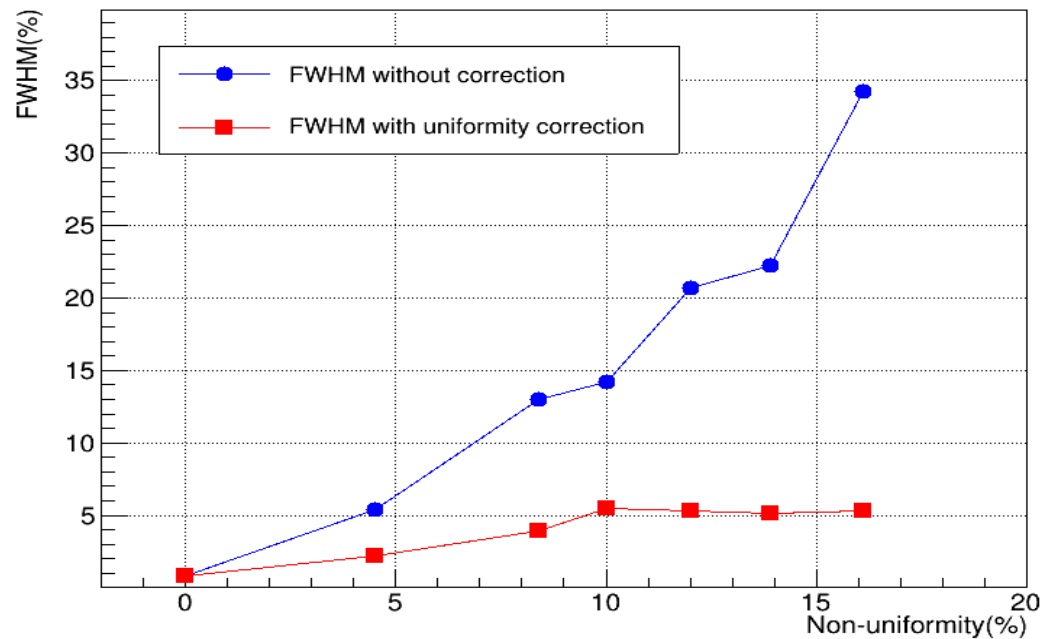
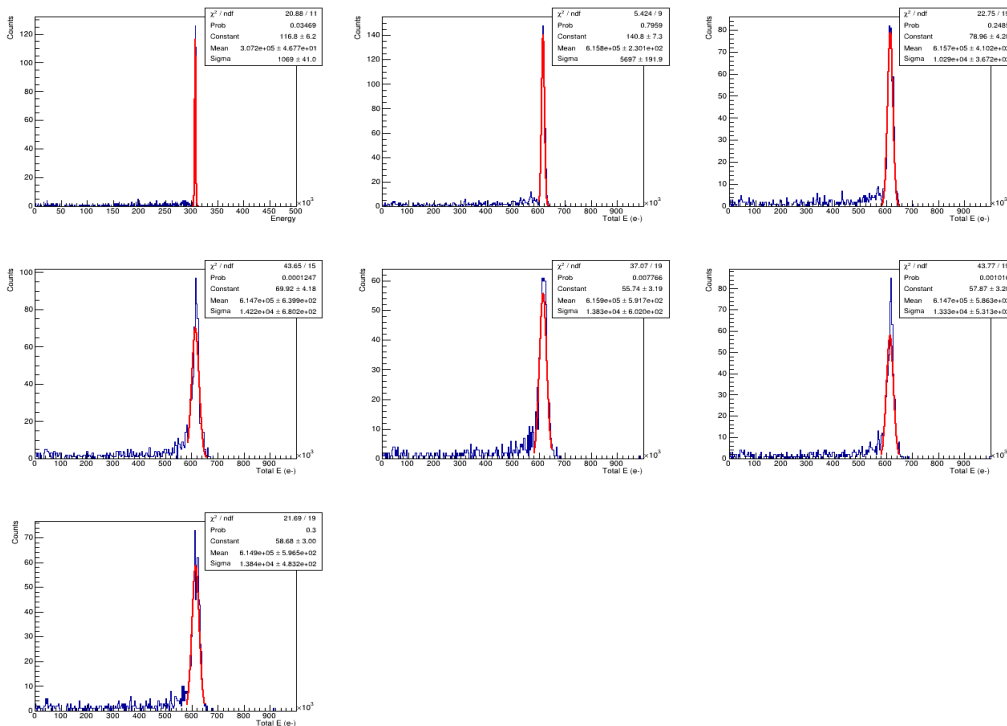


整体能量分辨率变差

# 需要的Micromegas增益非均匀性

0νββ事例能量分辨率与Micromegas非均匀性的关系

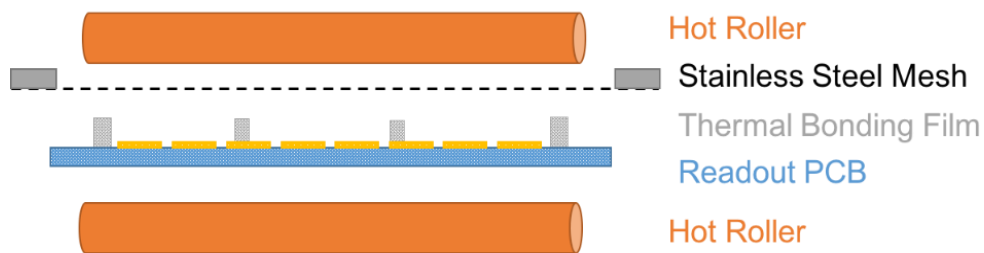
(REST 模拟)



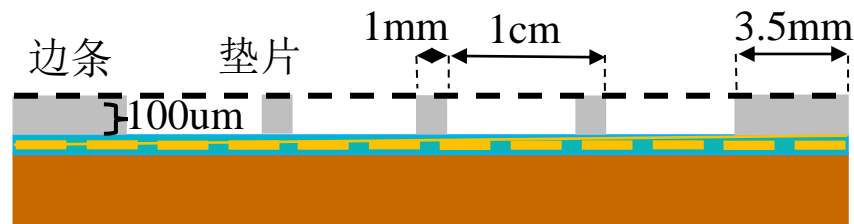
nonuniformity	1%	4.5%	8.4%	10.0%	12.0%	13.9%	16.1%
FWHM	0.82%	5.3%	13.0%	14.2%	20.7%	22.2%	34.3%
FWHM Cor	0.82%	2.2%	3.9%	5.4%	5.3%	5.1%	5.3%

考虑到能量分辨率的其它影响因素，暂时把Micromegas的增益非均匀性目标定为**5%**，以达到3%能量分辨率@ 2.459 MeV

经过十余年的不断探索，**热压接方法**（TBM）日臻成熟，该方法提供了一种简洁、无蚀刻的 Micromegas 批量制作工艺。



热压接方法示意图



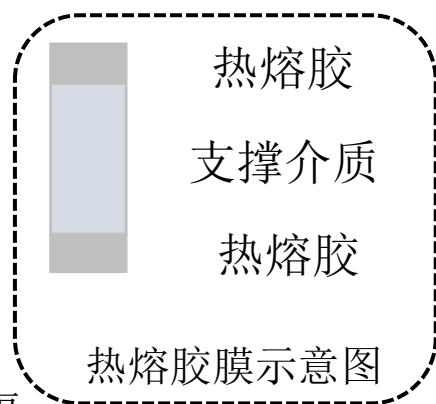
Micromegas侧视图



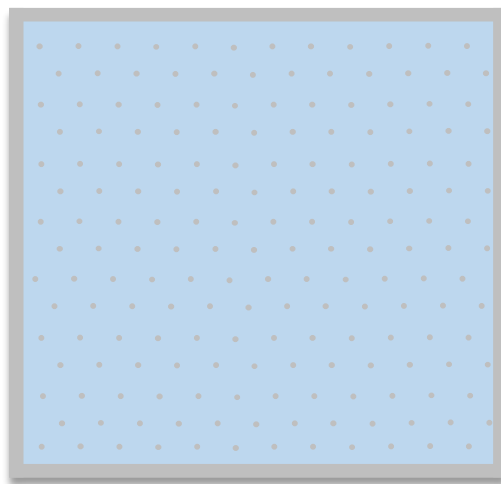
热压机

热压接工艺的优势:

- 无刻蚀, 无污染
- 制作简单
- 新结构容易制作
- 经济成本低
- $\Phi 0.5\text{mm} - \Phi 1\text{mm}$  胶柱,  $\sim 1\text{cm}$  间隔
  - ➔ 易清洁, 尤其是针对大面积探测器
  - ➔ 所有胶柱占面积  $< 1\%$



热熔胶膜示意图



Micromegas俯视图

# 应用于 PandaX-III 的 Micromegas 的发展

12/2019

V1



02/2020

V2



04/2020

V3



08/2020

V4



11/2020

V5



06/2021至今

V6



试图解决的问题:

窄边框

低放射性

能量分辨率

非均匀性和长时间稳定运行

硬质（环氧树脂）PCB

柔性（聚酰亚胺）PCB

➤ 验证窄边框、优良的能量分辨率和长期稳定运行能力

➤ 拥有低放射性和柔性连接

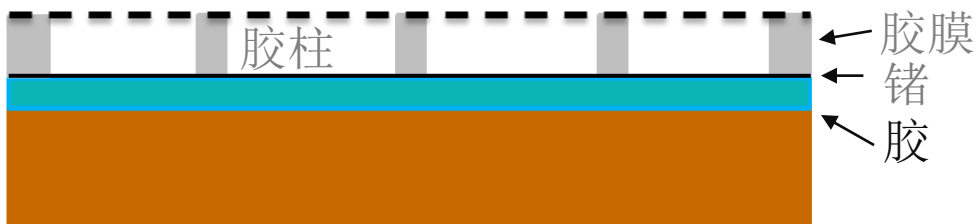




# 低放射性材料

## 低放射性材料

丝网  
PCB  
铜板



## 放射性强度测试

- ▶ 样品: 热压接Micromegas 的制作材料
- ▶ 地点: 锦屏地下实验室
- ▶ 设备: 低本底 $\gamma$ 量能器

单位:  $\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$



Name: P3MMmesh325  
Label: P3MMmesh325  
Weight(kg): 0.04041  
Number:

Name: P301ExpoyResin  
Label:  
Weight(kg): 0.00666  
Number: 12



Name: P3FlexibleBoard  
Label:  
Weight(kg):  
Number: 12  
Description: P3FlexibleBoard  
Geometry: 5.5\*10.5\*0.5cm

Name: P3MMfilm141  
Label: P3MMfilm141  
Weight(kg): 0.03329  
Number: 5  
Description: P3MMfilm141  
Geometry: 9.5\*9.5\*0.3cm

Sample	$^{232}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{40}\text{K}$	$^{60}\text{Co}$
PCB	$0.91 \pm 1.42$	-	$0.28 \pm 0.55$	$22.6 \pm 9.07$	$0.37 \pm 0.31$
SS wire mesh	$0.24 \pm 0.12$	$<0.01$	$0.08 \pm 0.04$	$0.69 \pm 0.58$	$<0.01$
Film	$1.00 \pm 0.33$	$<0.01$	$11.57 \pm 1.57$	$1.67 \pm 1.28$	-
Epoxy glue	$1.40 \pm 0.75$	-	$0.05 \pm 0.25$	-	-
<b>Total</b>	<b><math>3.55 \pm 1.64</math></b>	$<0.01$	<b><math>11.98 \pm 1.68</math></b>	$24.96 \pm 9.22$	$0.37 \pm 0.31$
<b>Microbulk-Micromegas</b>	<b><math>&lt;9.3</math></b>	$<13.9$	<b><math>26.3 \pm 13.9</math></b>	$57.3 \pm 24.8$	$<3.1^a$

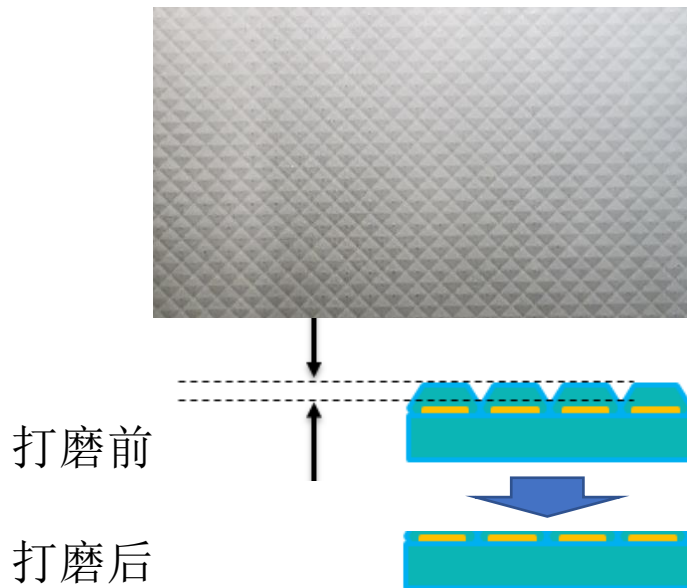
热压接Micromegas 和 Microbulk Micromegas  
均具有**低本底**特征



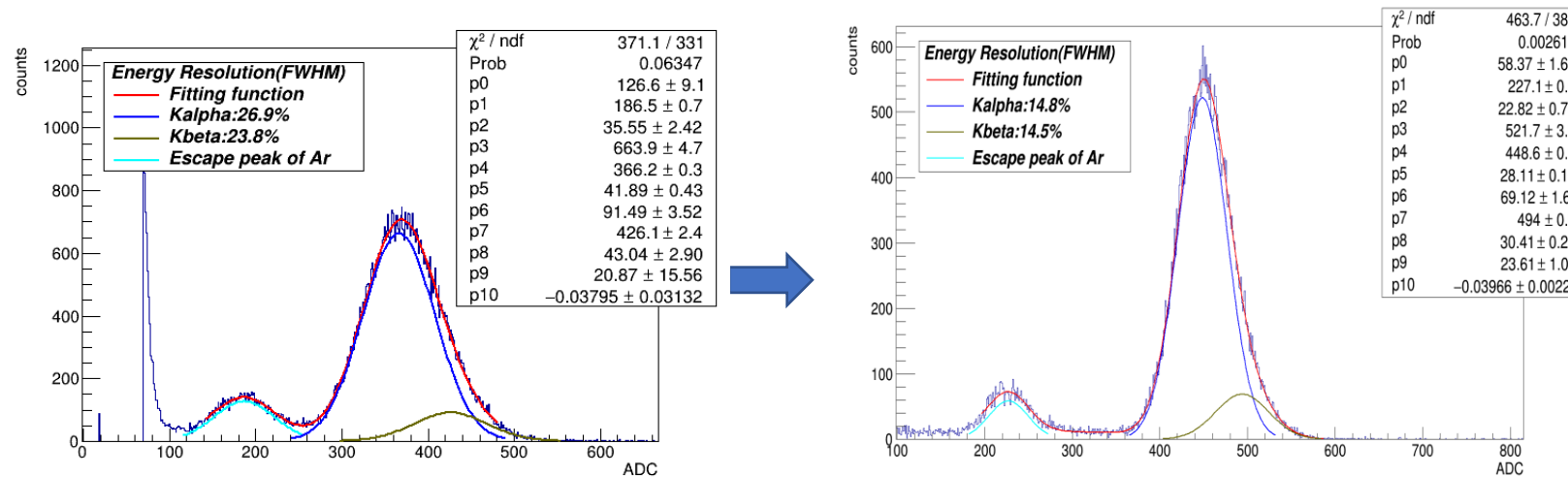


# 通过提高PCB平整度改善能量分辨率

在使用柔性PCB制作探测器时，发现因为PCB表面绝缘层不平整，导致能量分辨率变差



打磨PCB表面



打磨前能量分辨率: ~27%  
(Ar+3.5% Iso@5.9keV)

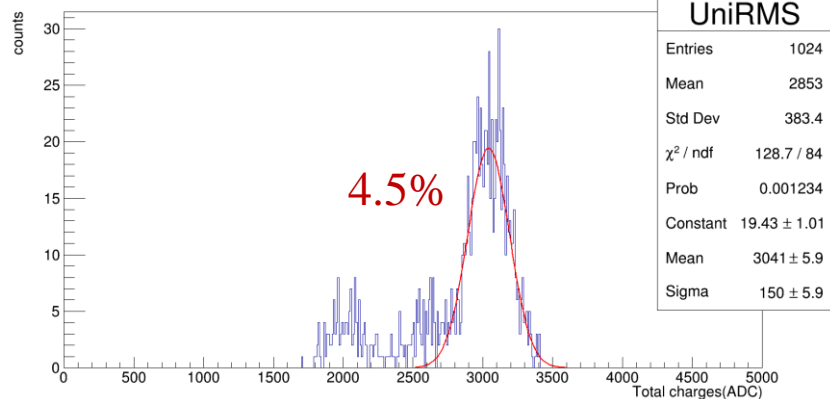
打磨后能量分辨率: ~15%  
(Ar+2.5% Iso@5.9keV)

打磨过程可以有效改善能量分辨率

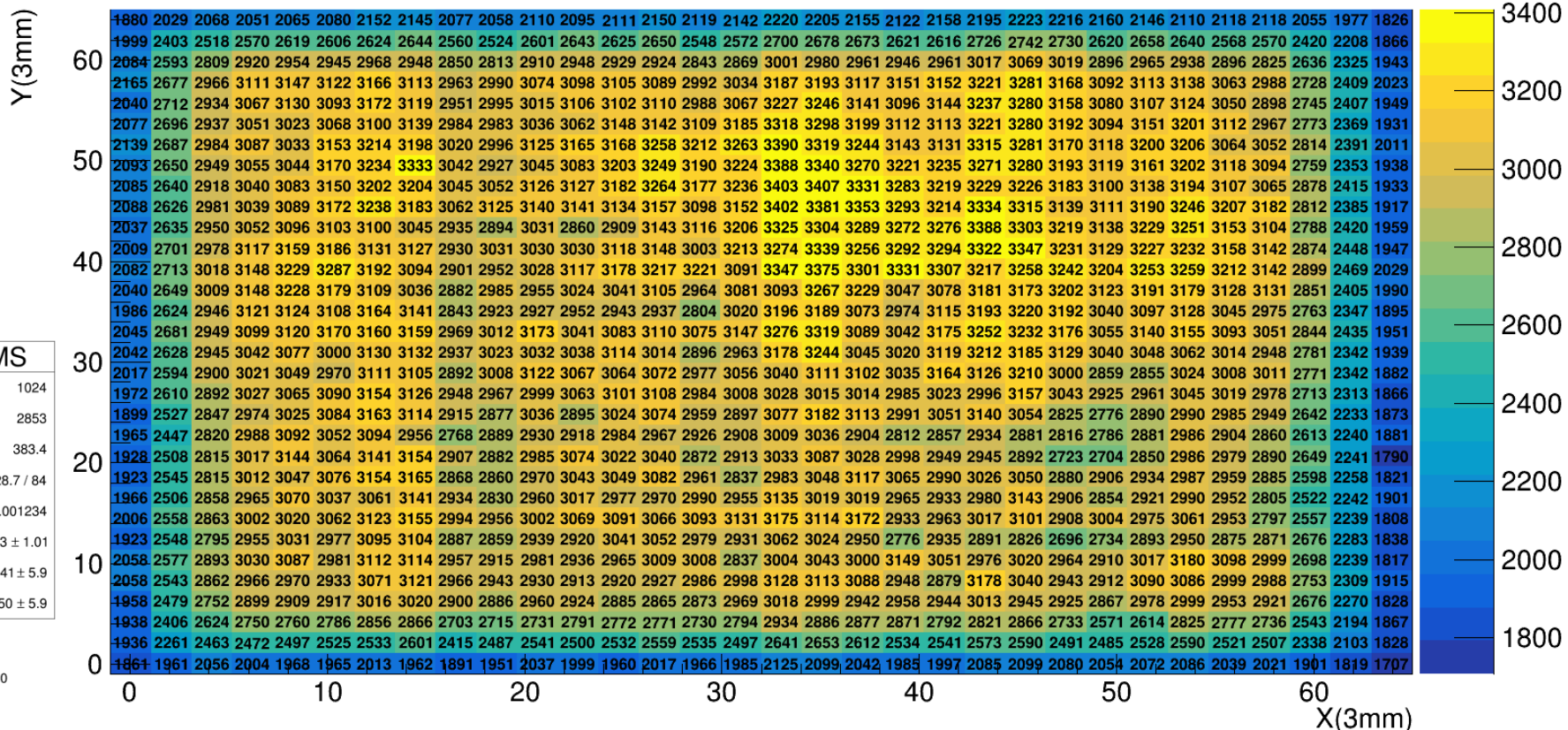


# 增益非均匀性的改善

V696  
 非均匀性: 13.9%  
 (非均匀性 = RMS/Average)

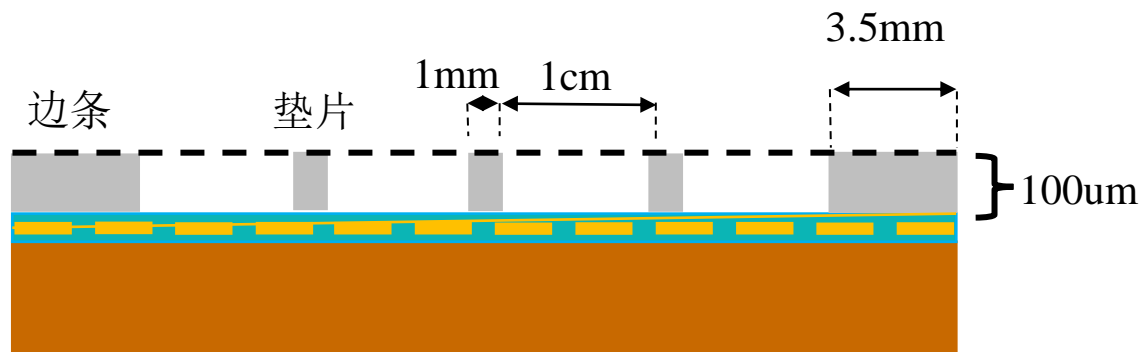


非均匀性一维图

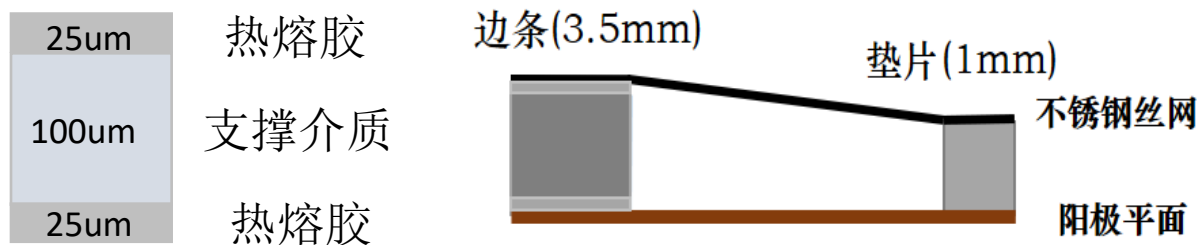


非均匀性二维图  
(数字代表每个bin的ADC)

# 增益非均匀性的改善



热压接Micromegas侧视图

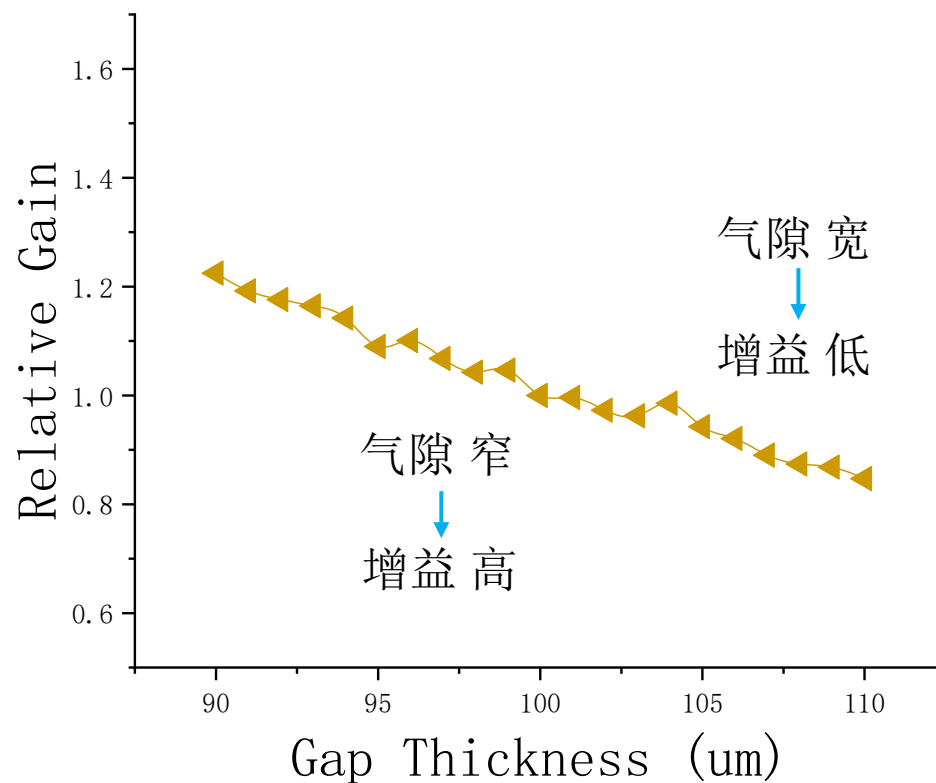


热压接膜示意图

Micromegas边缘示意图

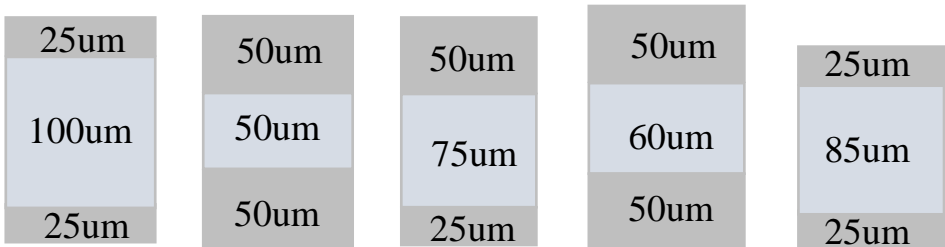
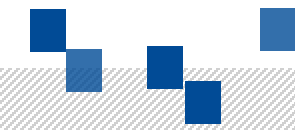
需要把边条融化后的厚度降低到和垫片一样

- 改变热压接条件（压力、温度、压接次数）不可行
- 选择合适的边条





# 增益非均匀性的改善



试验过的胶膜尺寸

- 因为热熔胶融化过程控制难度大，需要尝试不同厚度胶膜
- 经过多方挑选，最终找到了满足要求的胶膜
- 非均匀性的极大改善，从>10% 到 ~5%

从 购买外国胶膜 到 尝试国产替代  
 从 购买定制胶膜 到 尝试自制胶膜

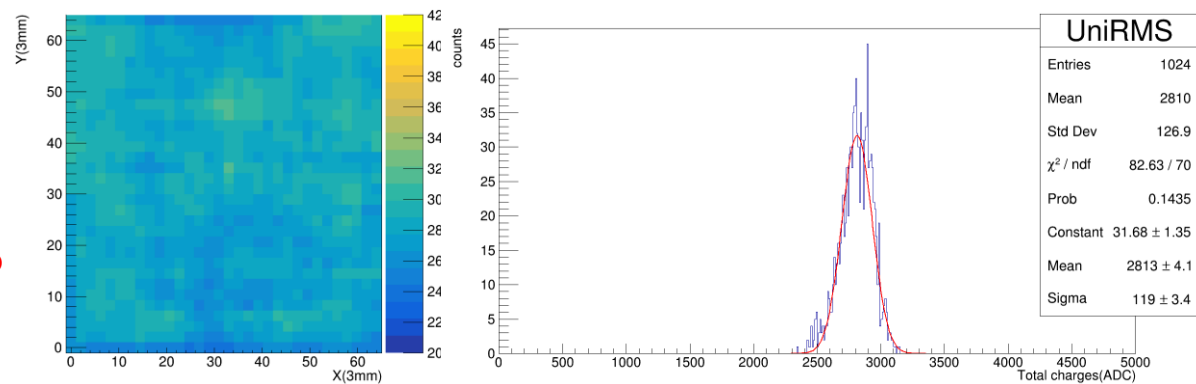
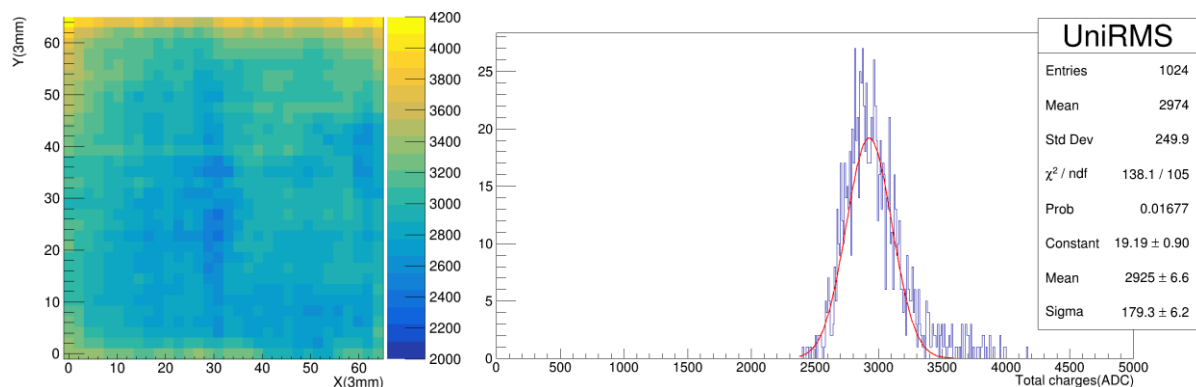
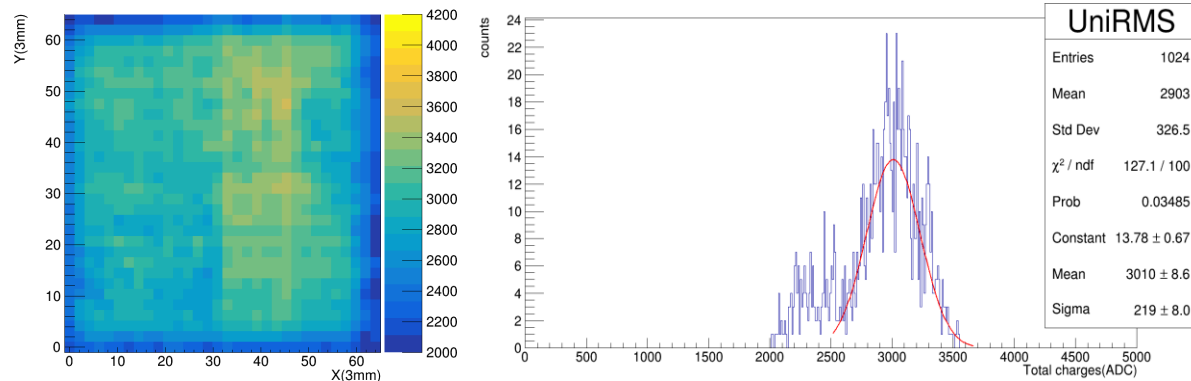
非均匀性: 11.2%



非均匀性: 8.4%



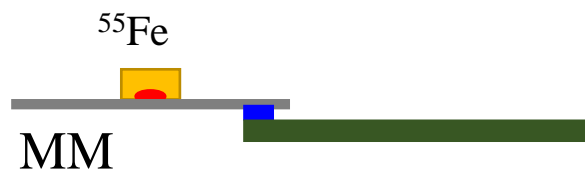
非均匀性: 4.5%



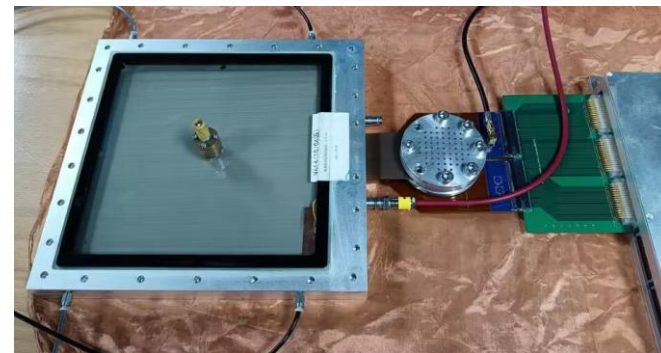


使用多道测试电子透过率、增益、能量分辨率

- 放射源:  $^{55}\text{Fe}$
- 气体: Ar+ 3.5% Iso
- 气压: ~ 1 bar

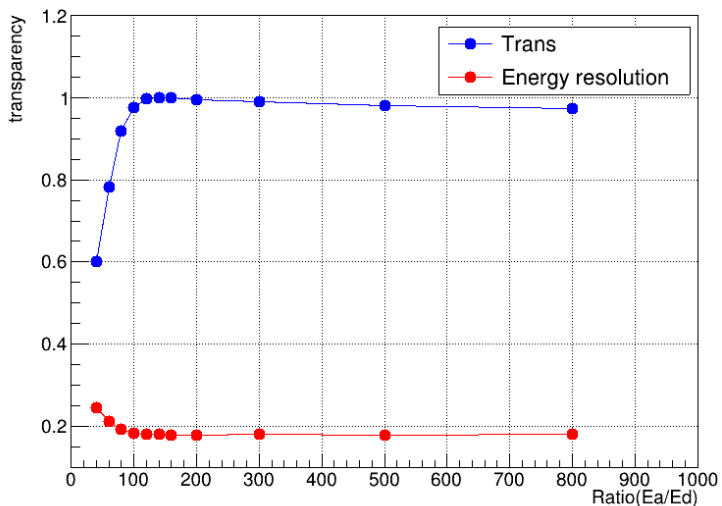


测试示意图

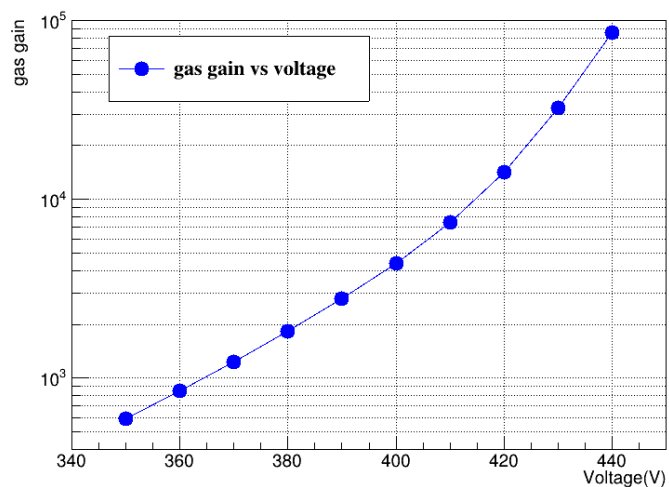


测试照片

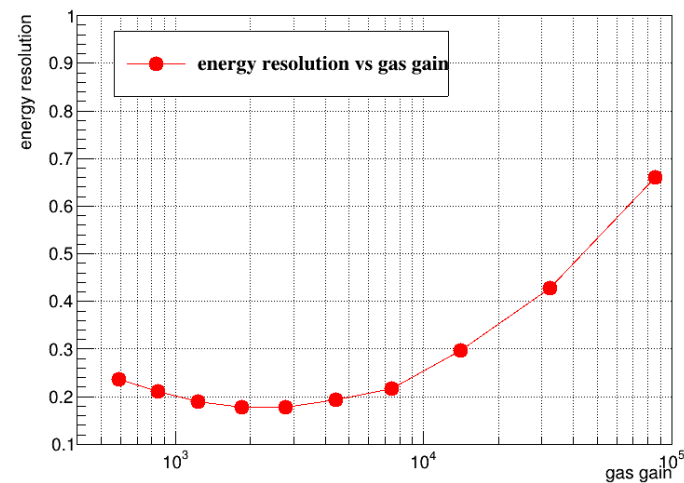
V691@77



相对电子透过率



最高增益可达 $10^5$



优异的能量分辨率



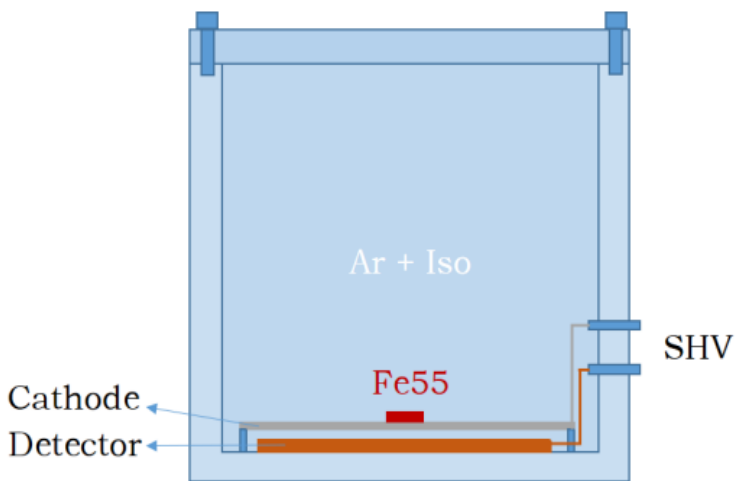
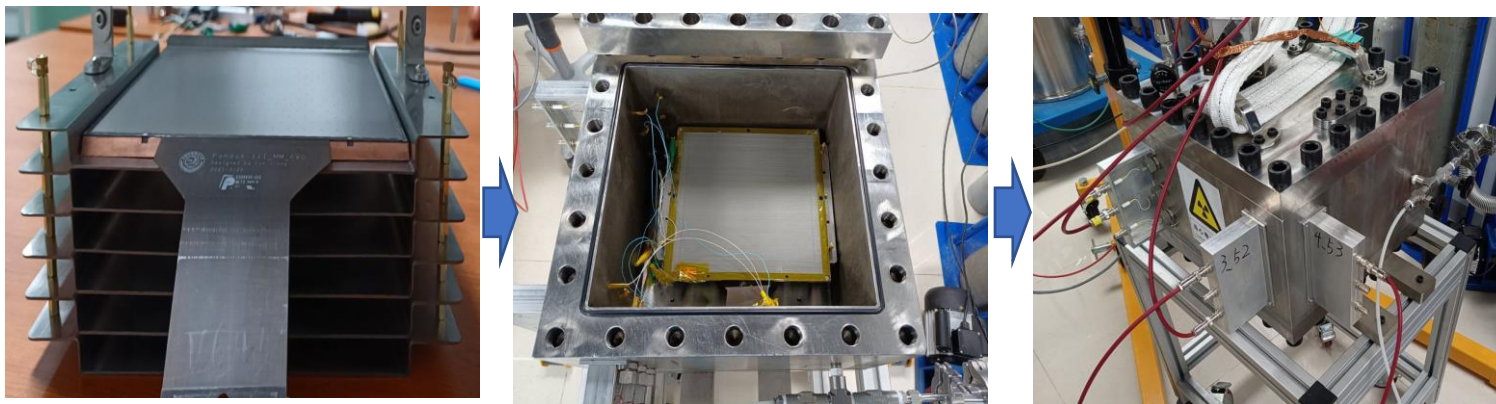
# 高气压测试

使用多道测试电子透过率、增益、  
能量分辨率

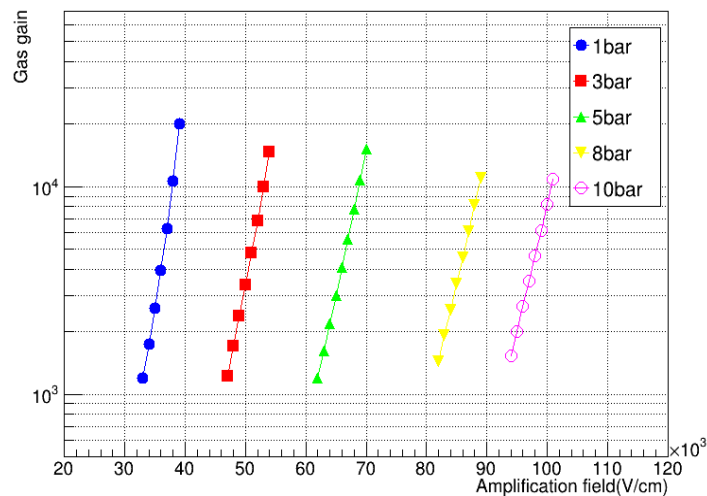
➤放射源:  $^{55}\text{Fe}$

➤气体: Ar+2.5% Iso

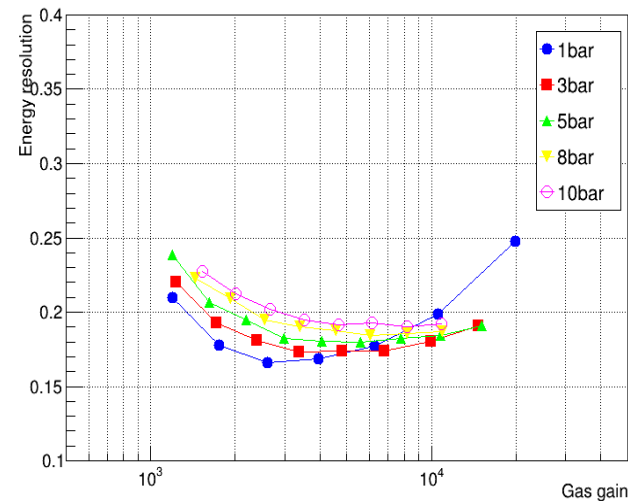
➤气压: 1 3 5 8 10 bar



高气压测试平台



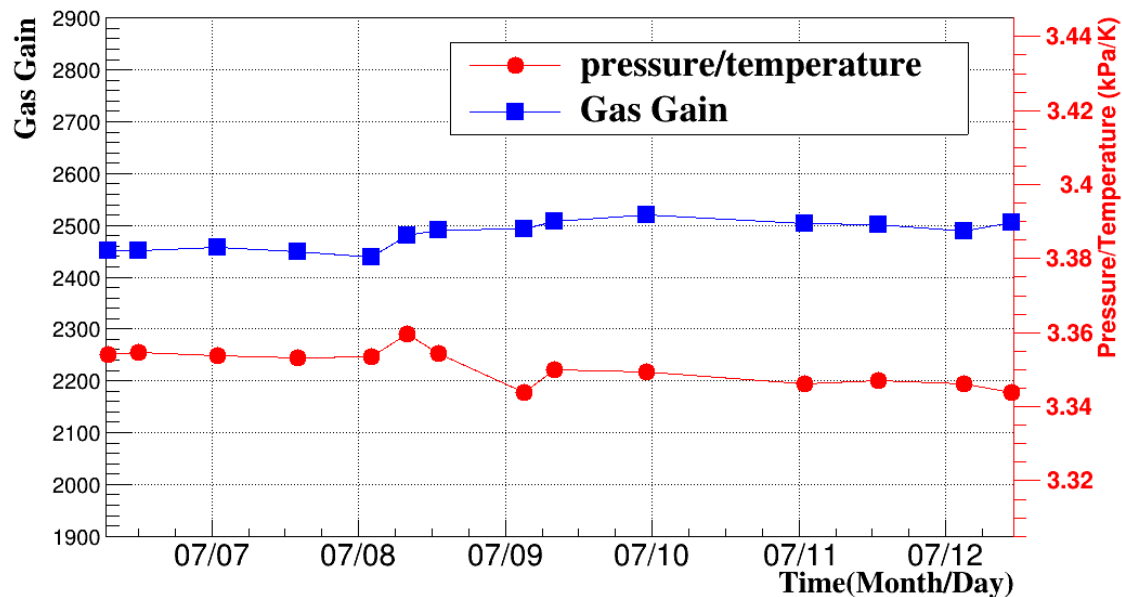
增益最高可达  $10^4$



能量分辨率 ~ 20%



# 高压下的稳定性测试

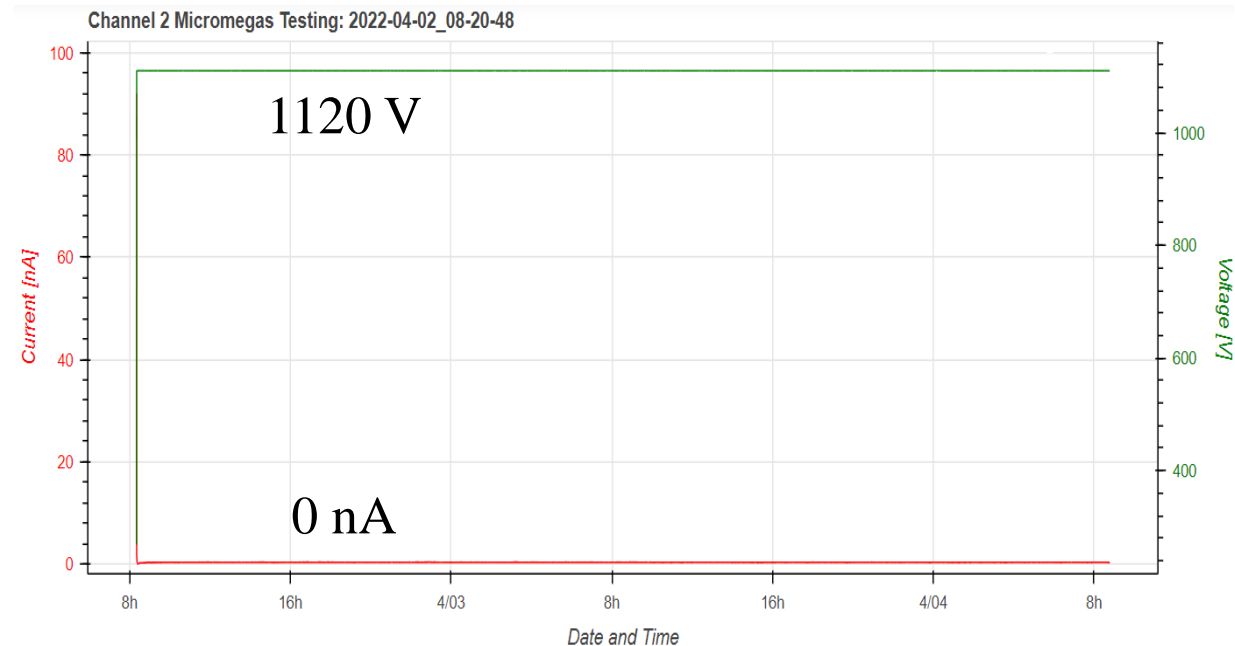


稳定运行 > 6 天

由于高压罐漏气，增益逐渐增大(变化幅度< 3%)

存在的问题:

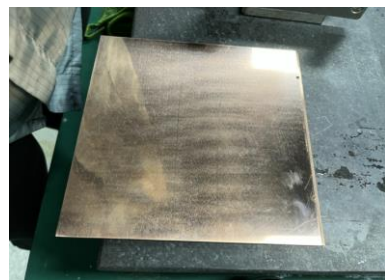
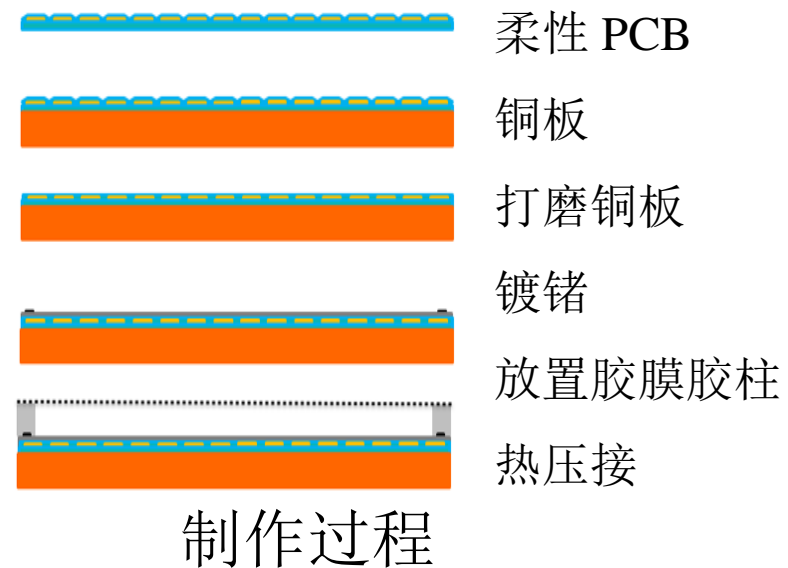
- 部分Micromegas在高压测试中会出现无法恢复正常工作状态的打火
- 可能的原因: 部分区域气隙太窄



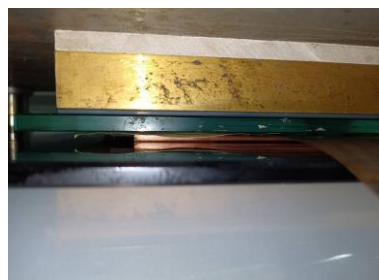
稳定运行 > 24 hours

长时间电压和电流监测





打磨铜板



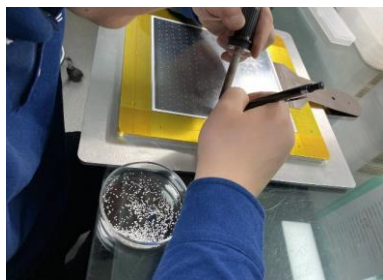
粘接PCB和铜板



打磨PCB板



镀锗

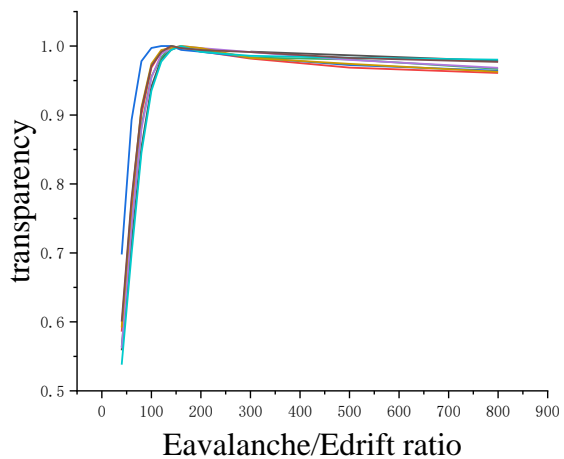
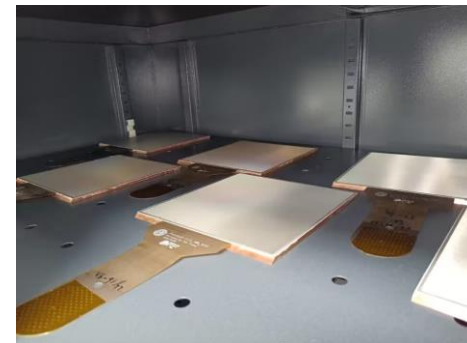
在PCB板上放置  
边条和垫片

热压接

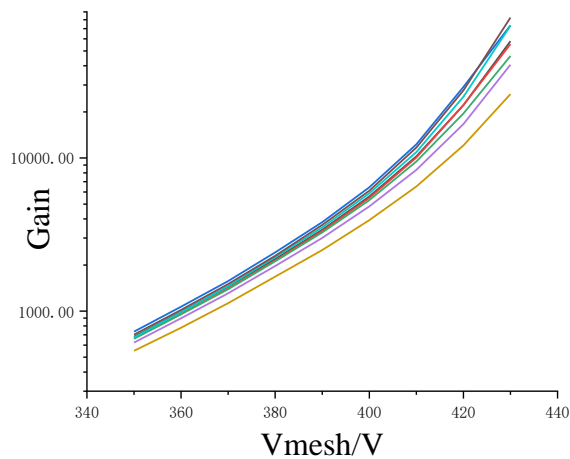
裁剪丝网  
检查丝网边缘

简单测试

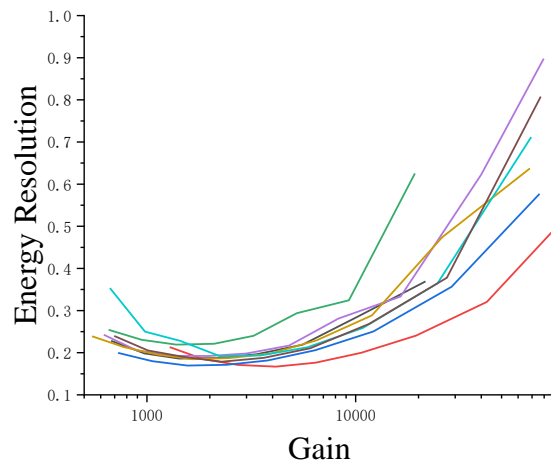
- 测试电子透过率、增益、能量分辨率
- 测试增益非均匀性
- 多数Micromegas的性能表现具有一致性
- 质量控制是合格的



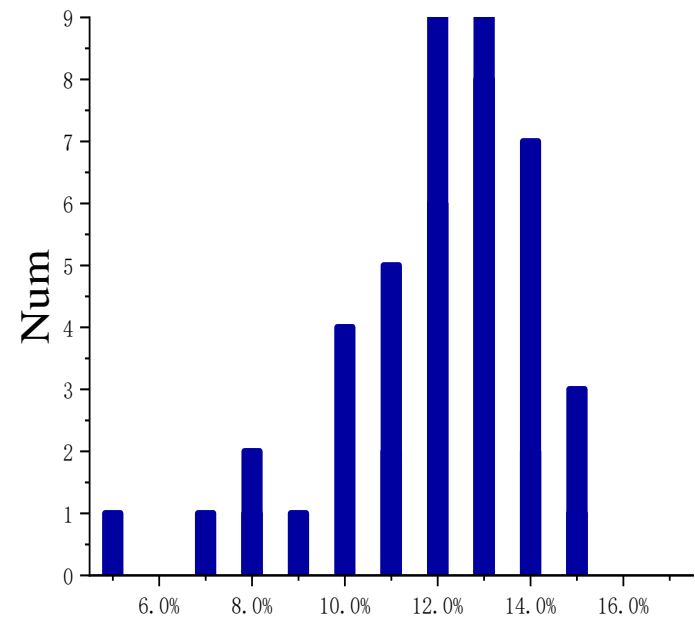
电子透过率



增益



能量分辨率

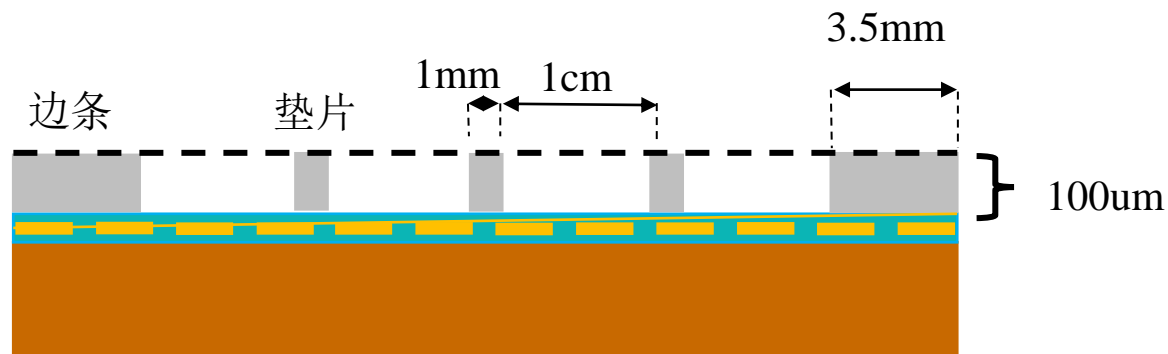


Uniformity of 52 MMs

增益非均匀性

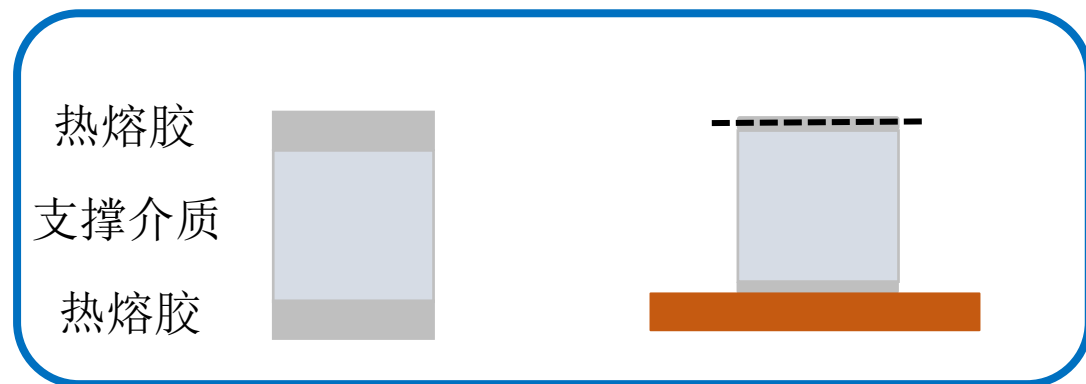


# 丝网印刷方法

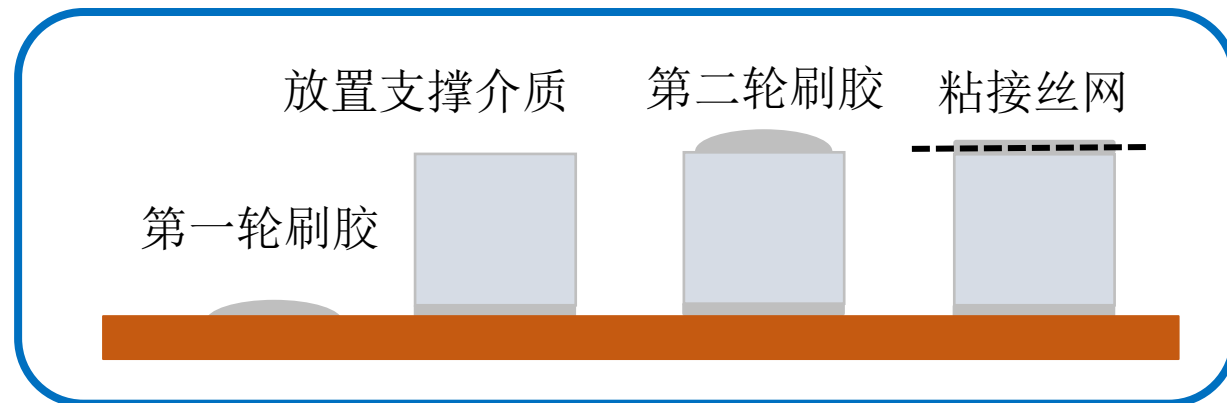


热压接Micromegas侧视图

- 热压接和丝网印刷都是通过胶将丝网、绝缘介质、阳极板粘接在一起
- 热熔胶膜（由热熔胶和中间的绝缘介质组成）是一体的，热压时直接放置即可
- 丝网印刷所需胶水和绝缘介质是分别放置的



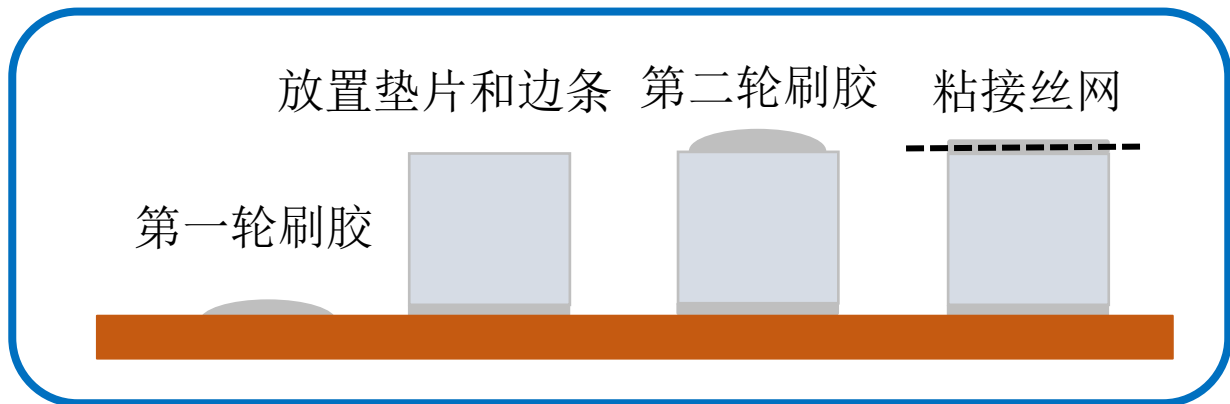
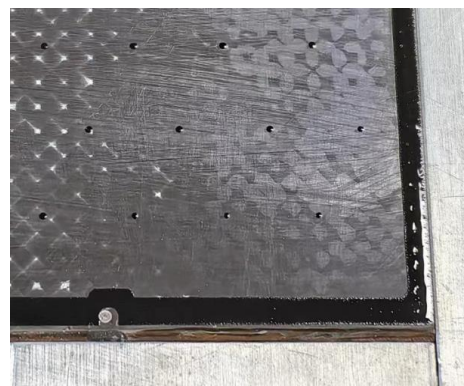
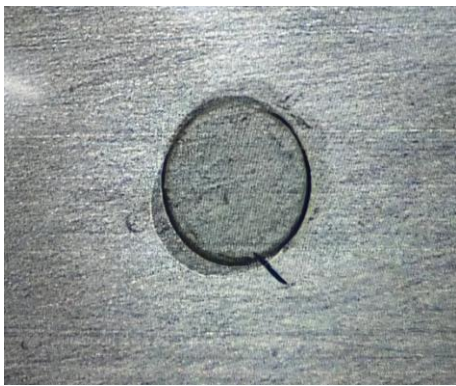
热压接方法示意图



丝网印刷方法示意图



# 丝网印刷方法



丝网印刷示意图

第一轮刷胶

放置垫片和边条

第二轮刷胶

粘接丝网





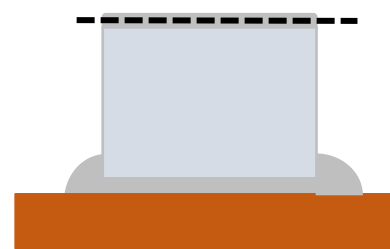
# 为什么选择丝网印刷方法

- ▶ 丝网印刷的最大优点：方便制作**不同雪崩气隙厚度**的Micromegas  
(使用不同厚度的支撑介质即可)
- ▶ 使用更少胶量的胶水替代热熔胶，避免溢胶，优化边条附近气隙，  
提高Micromegas高压下**稳定性**
- ▶ 可以选择低放射性材料替代热熔胶膜，更进一步**降低本底**

单位:  $\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$

Sample	$^{232}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{40}\text{K}$	$^{60}\text{Co}$
PCB	$0.91 \pm 1.42$	-	$0.28 \pm 0.55$	$22.6 \pm 9.07$	$0.37 \pm 0.31$
SS wire mesh	$0.24 \pm 0.12$	<0.01	$0.08 \pm 0.04$	$0.69 \pm 0.58$	<0.01
Film	$1.00 \pm 0.33$	<0.01	<b><math>11.57 \pm 1.57</math></b>	$1.67 \pm 1.28$	-
Epoxy glue	$1.40 \pm 0.75$	-	$0.05 \pm 0.25$	-	-
<b>Total</b>	<b><math>3.55 \pm 1.64</math></b>	<0.01	<b><math>11.98 \pm 1.68</math></b>	$24.96 \pm 9.22$	$0.37 \pm 0.31$

热熔胶  
支撑介质  
热熔胶



热熔胶边条状态

胶水



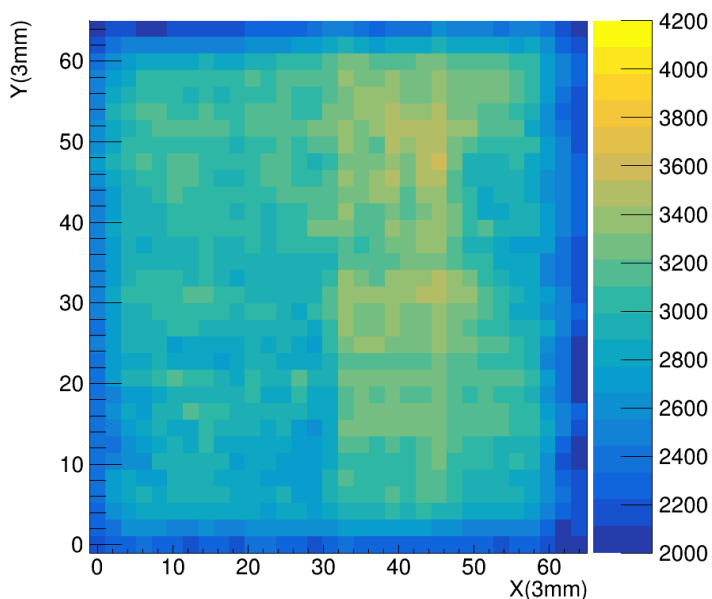
边条

丝网印刷边条状态

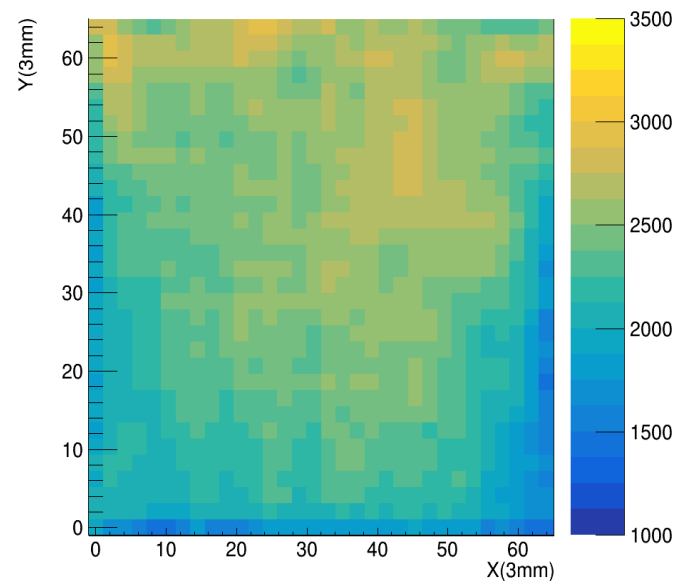


# 丝网印刷方法

- 两种方法制作的Micromegas在实际使用过程中都很稳定可靠
- 除了用丝网印刷替代热压接，其余批量制作流程皆相同
- 丝网印刷Micromegas增益非均匀性情况与热压接有所不同，需要后续优化



热压接方法典型增益非均匀性图



丝网印刷方法典型增益非均匀性图

- 中国科大研究的热压接和丝网印刷方法在低本底高能量分辨实验中是很有竞争力的方案
- 经过6个版本的迭代之后，窄边框、低放射性、高能量分辨率、低增益非均匀性、高增益均已实现
- 批量制作流程已经建立
- 因为优异的质量控制，批量生产的Micromegas性能表现具有一致性
- Micromegas高压长时间运行稳定性问题正在尝试解决
  
- 通过使用丝网印刷方法，继续对应用于PandaX-III 实验的Micromegas进行升级，包括避免溢胶优化气隙、选择更低本底的制作材料



Thanks for listening