

应用于PandaX-III 实验的热压接 Micromegas的研制与生产



报告人：彭云志 文思成 张志永



第十一届全国先进气体探测器研讨会 2023



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

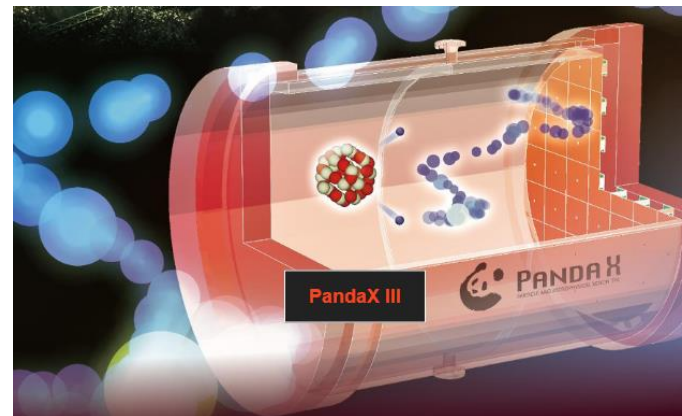
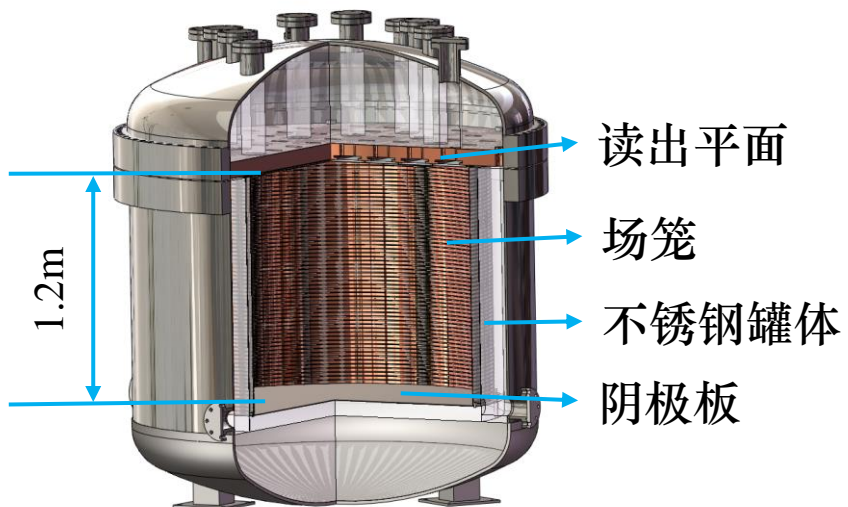
Micromegas 的制作和性能测试

IV

Micromegas 的批量制作和质量控制

V

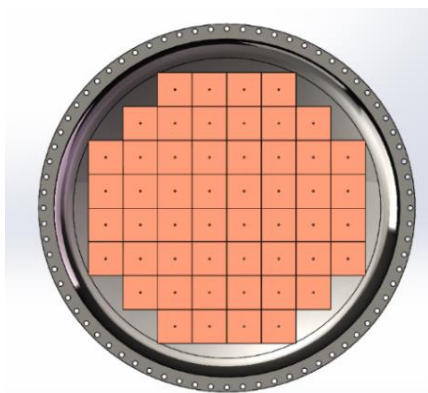
总结



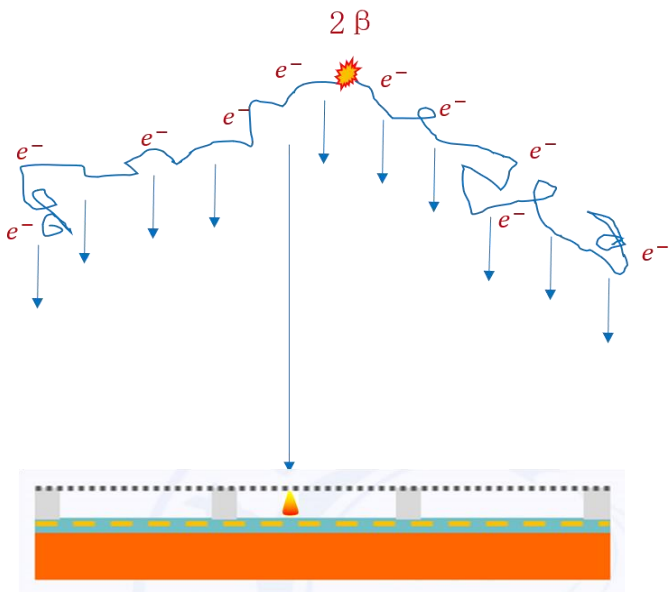
位于锦屏地下实验室 (CJPL-II) 的PandaX-III 实验使用高气压时间投影室 (TPC) 搜寻 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变 (NLDBD)

读出平面的需求:

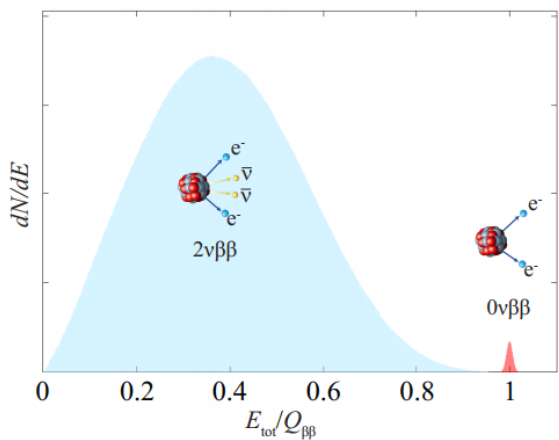
- 3% 能量分辨率@ 2.459 MeV
- 低放射性
- 稳定高增益 ~500@ 10 bar 以确保足够高的信噪比
- 长时间稳定运行@ 10 bar



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

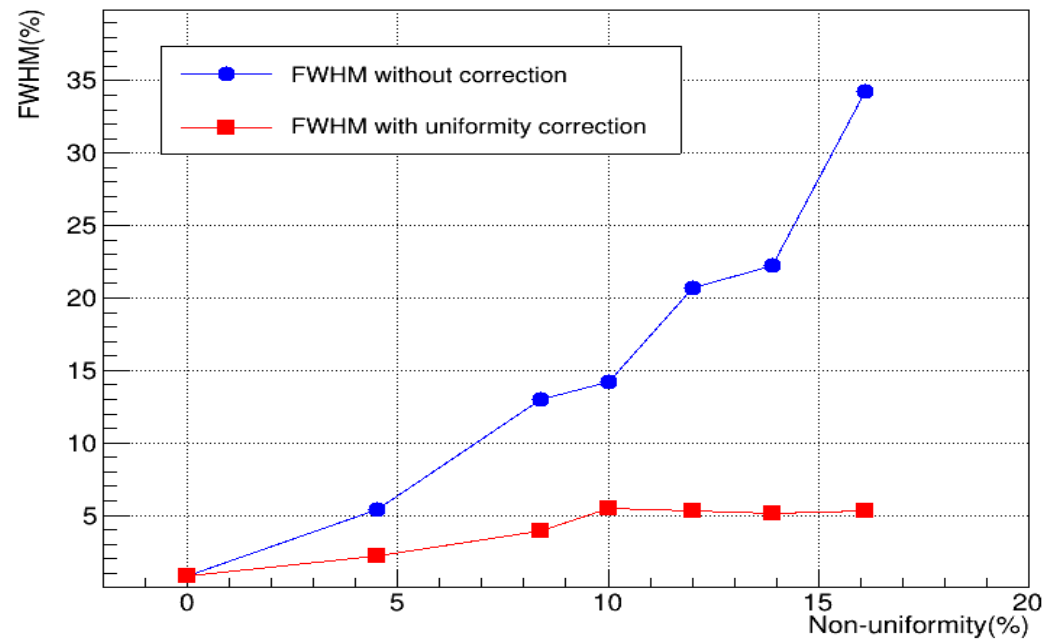
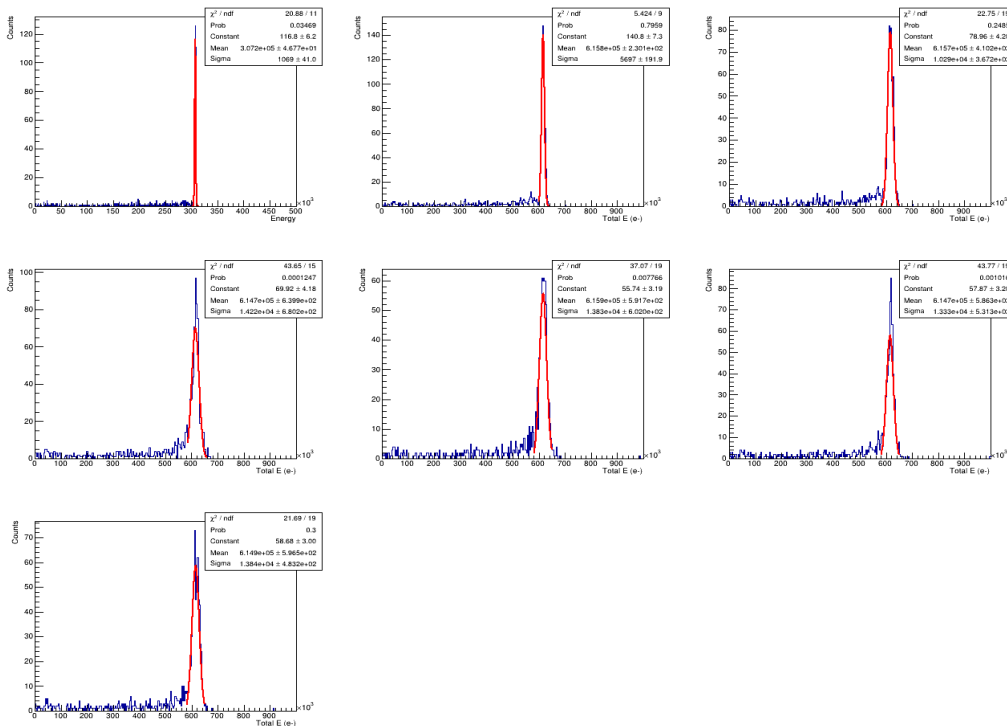


整体能量分辨率变差

需要的Micromegas增益非均匀性

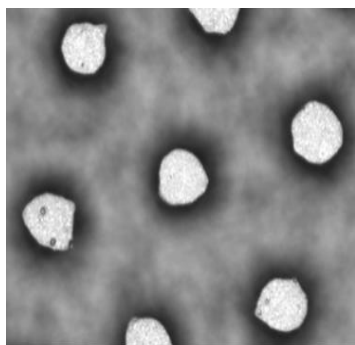
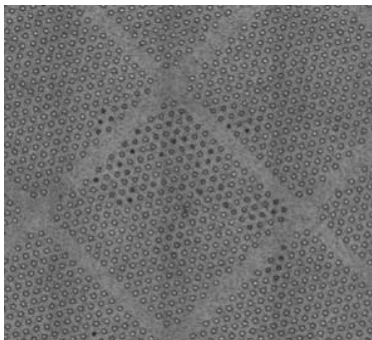
0νββ事例能量分辨率与Micromegas非均匀性的关系

(REST 模拟)

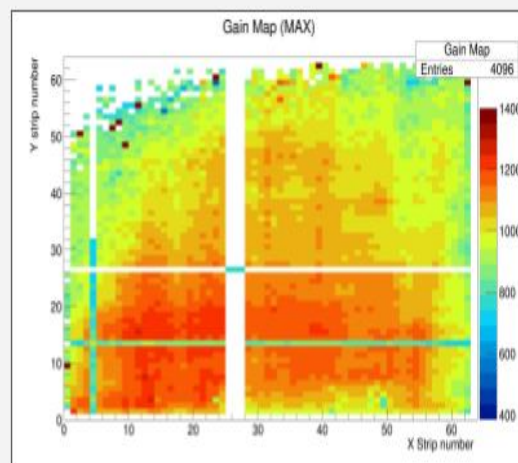


nonuniformity	1%	4.5%	8.4%	10.0%	12.0%	13.9%	16.1%
FWHM	0.82%	5.3%	13.0%	14.2%	20.7%	22.2%	34.3%
FWHM Cor	0.82%	2.2%	3.9%	5.4%	5.3%	5.1%	5.3%

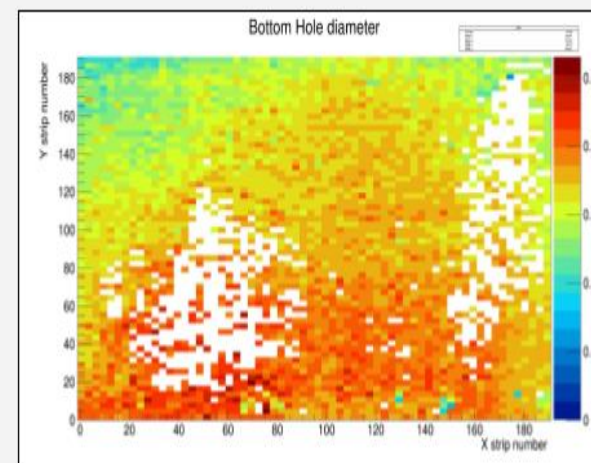
考虑到能量分辨率的其它影响因素，暂时把Micromegas的增益非均匀性目标定为**5%**，以达到3%能量分辨率@ 2.459 MeV



Micro-bulk Micromegas



增益分布图



孔尺寸分布

选择Micro-bulk出现的问题:

- 坏道多、增益低 (<200 @ 10bar)、不稳定
- 孔尺寸不均匀、制作周期长 (>6 个月)

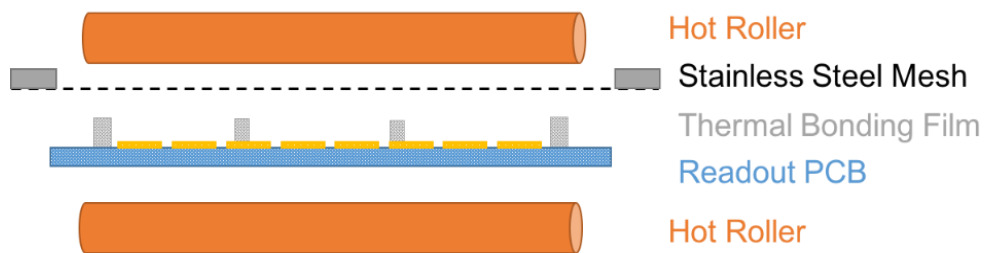
替代方案:

- 2019年11月起, 中科大开展低本底热压接Micromegas研究

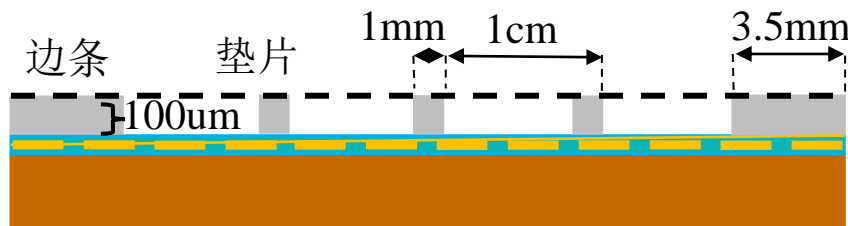


热压接方法

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。



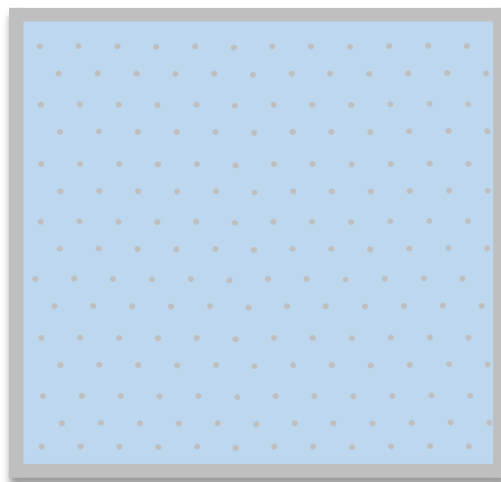
热压接方法示意图



Micromegas侧视图



热熔胶膜示意图



Micromegas俯视图



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 $< 1\%$

应用于 PandaX-III 的 Micromegas 的发展

12/2019

V1



02/2020

V2



窄边框

04/2020

V3



低放射性

08/2020

V4



能量分辨率

11/2020

V5



非均匀性和长时间稳定运行

06/2021-12/2022

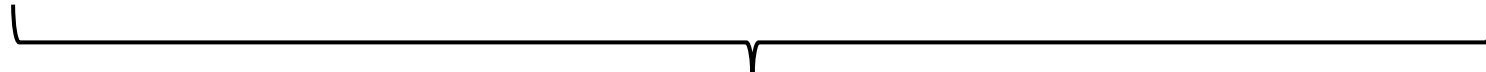
V6



试图解决的问题:



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

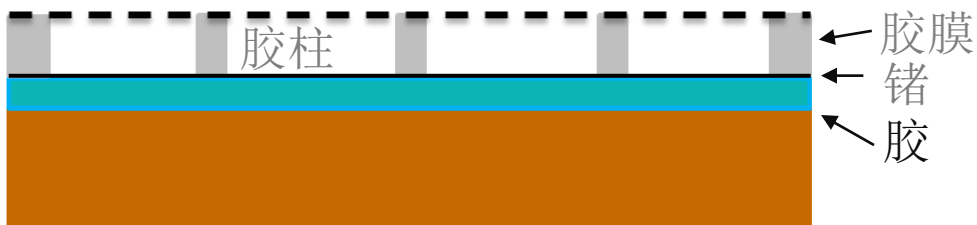
➤ 拥有低放射性和柔性连接



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 γ 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

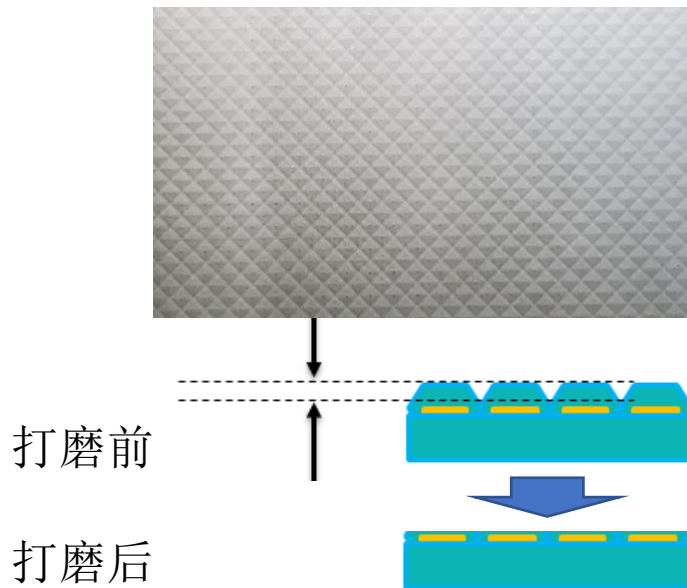
Sample	^{232}Th	^{235}U	^{238}U	^{40}K	^{60}Co
PCB	0.91 ± 1.42	-	0.28 ± 0.55	22.6 ± 9.07	0.37 ± 0.31
SS wire mesh	0.24 ± 0.12	<0.01	0.08 ± 0.04	0.69 ± 0.58	<0.01
Film	1.00 ± 0.33	<0.01	11.57 ± 1.57	1.67 ± 1.28	-
Epoxy glue	1.40 ± 0.75	-	0.05 ± 0.25	-	-
Total	3.55 ± 1.64	<0.01	11.98 ± 1.68	24.96 ± 9.22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

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

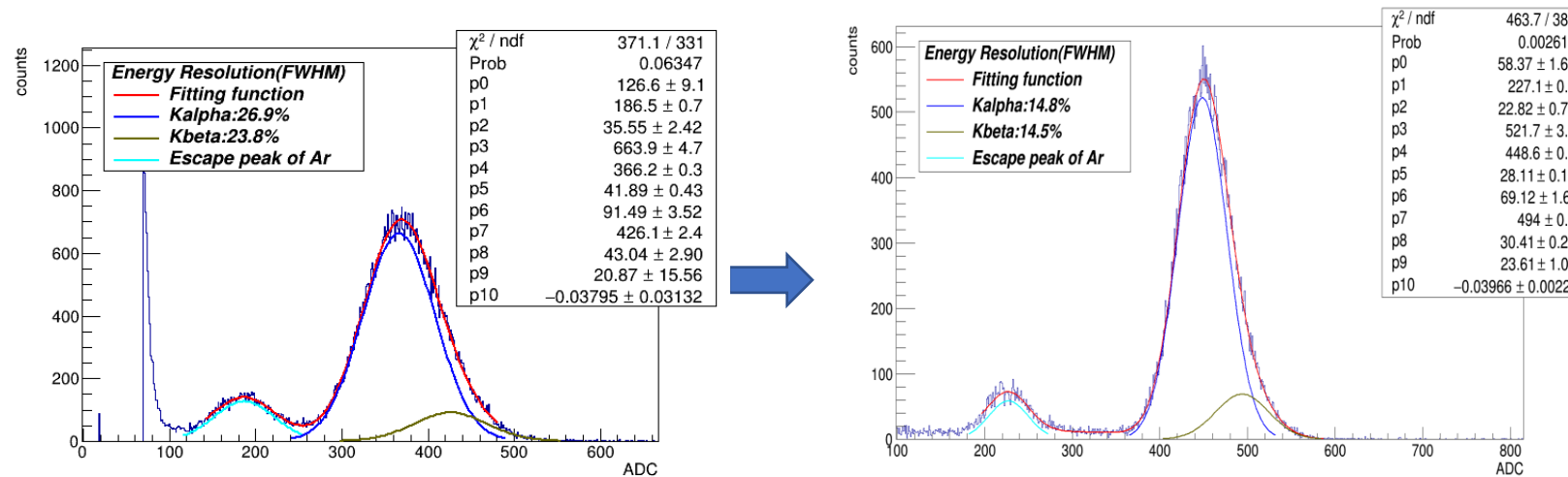


通过提高PCB平整度改善能量分辨率

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)

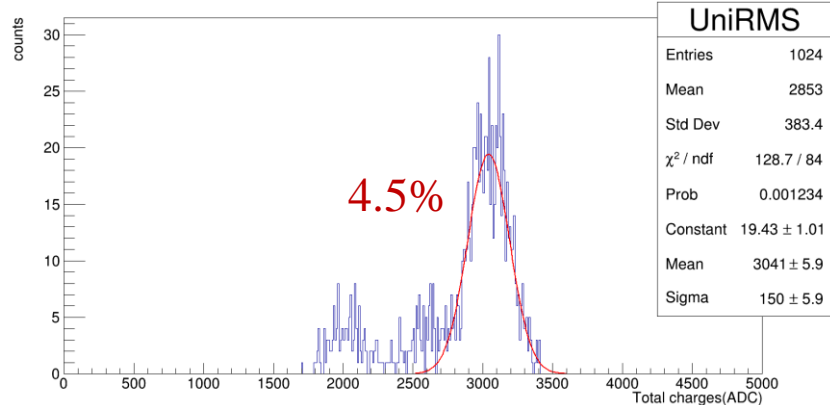
打磨后能量分辨率: ~15%
(Ar+2.5% Iso@5.9keV)

打磨过程可以有效改善能量分辨率

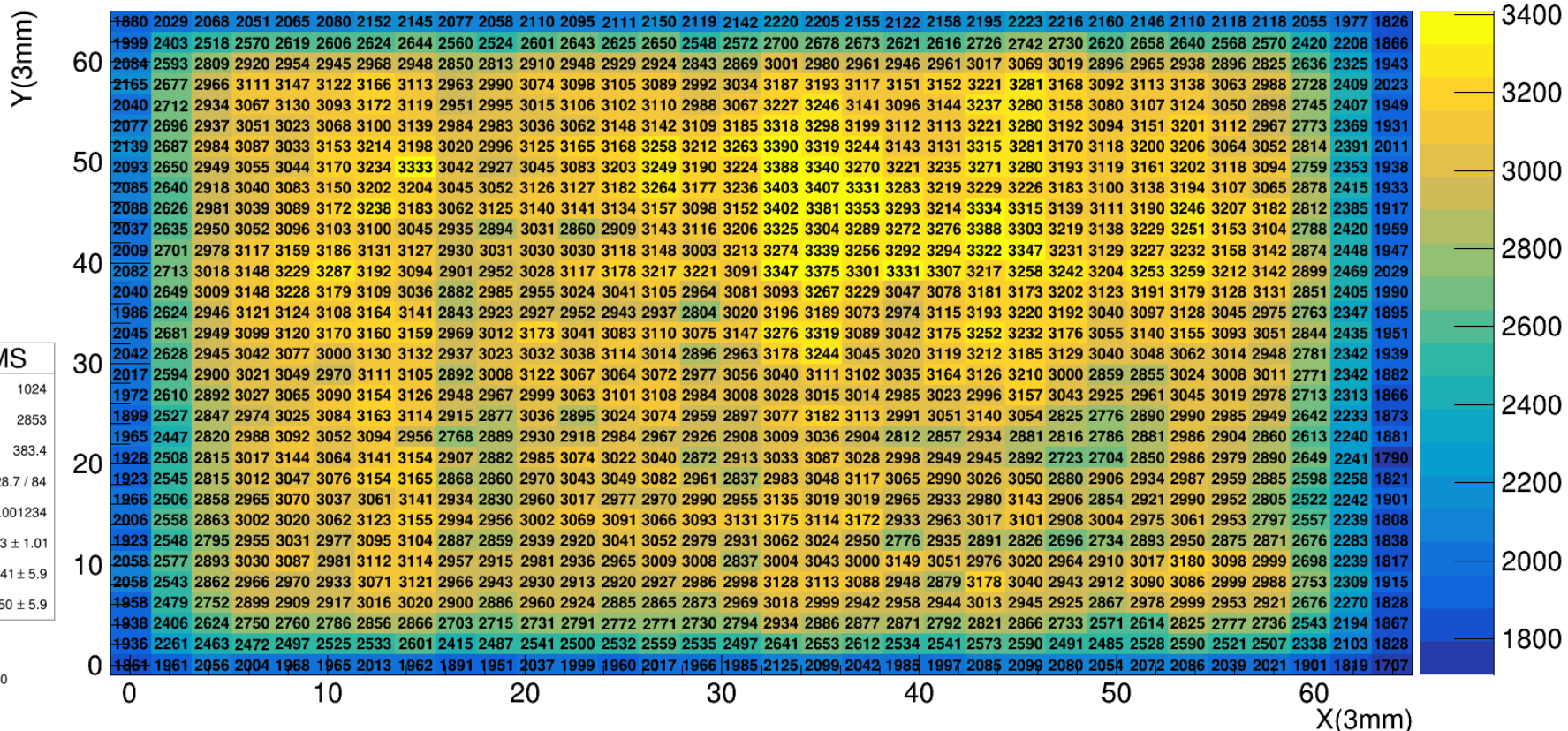


增益非均匀性的改善

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

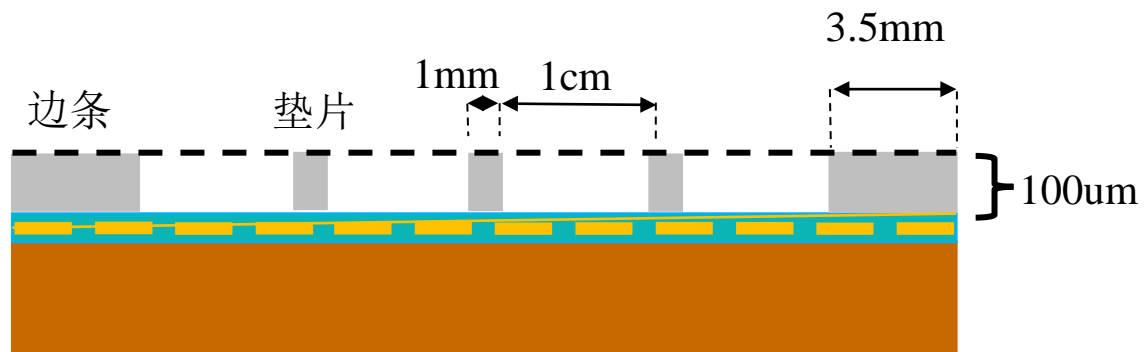


非均匀性一维图

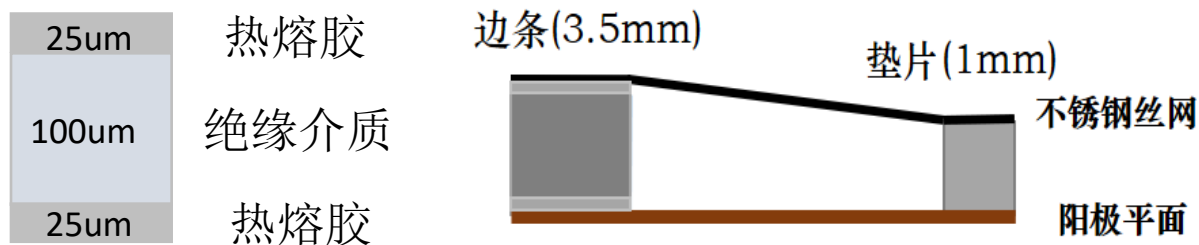


非均匀性二维图
(数字代表每个bin的ADC)

增益非均匀性的改善



热压接Micromegas侧视图

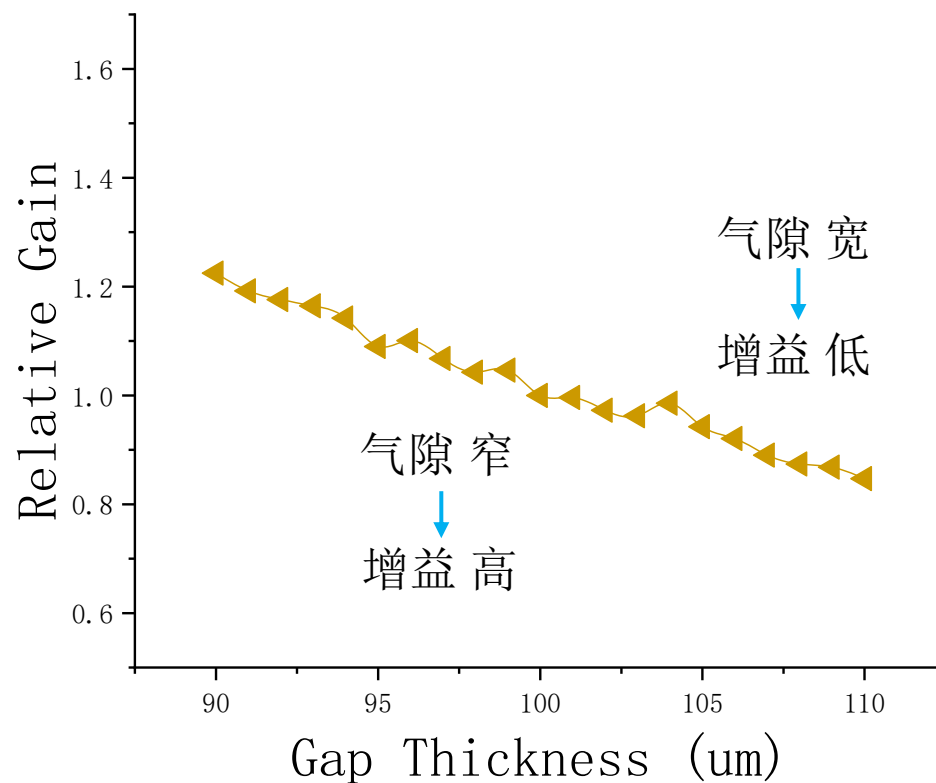


热压接膜示意图

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

对边条的处理

➤减小边条的宽度（3.5mm到2.5mm）

易脱胶 拉不住丝网

➤边条打孔（利于热熔胶融化并释放）

高气压下运行不稳定

➤减小热熔胶厚度

易脱胶 拉不住丝网

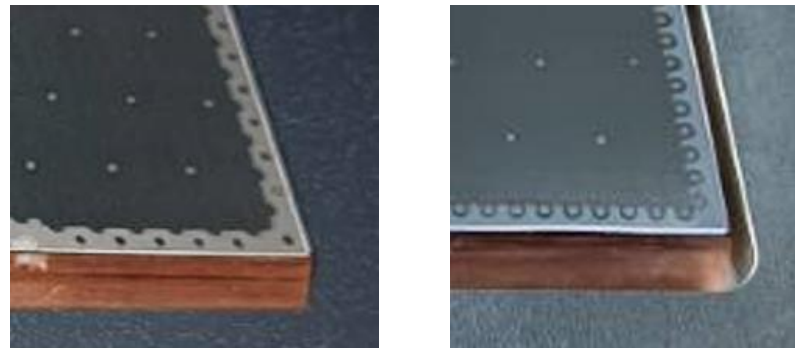
➤减小绝缘层厚度

厂家没有现有的合适厚度的胶膜

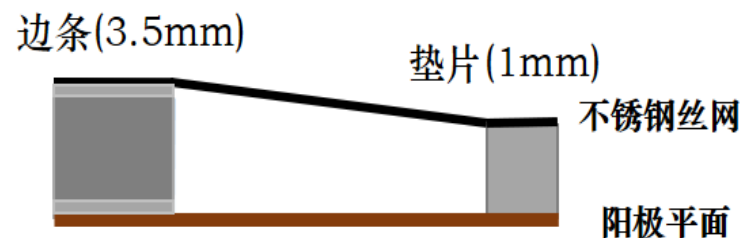
定制新的厚度的胶膜成本太高

尝试购买国产的绝缘材料和热熔胶

自制不同尺寸胶膜



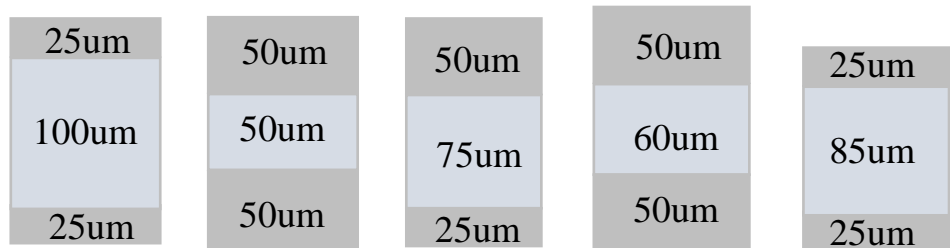
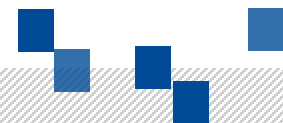
打孔后的边条



Micromegas边缘示意图



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

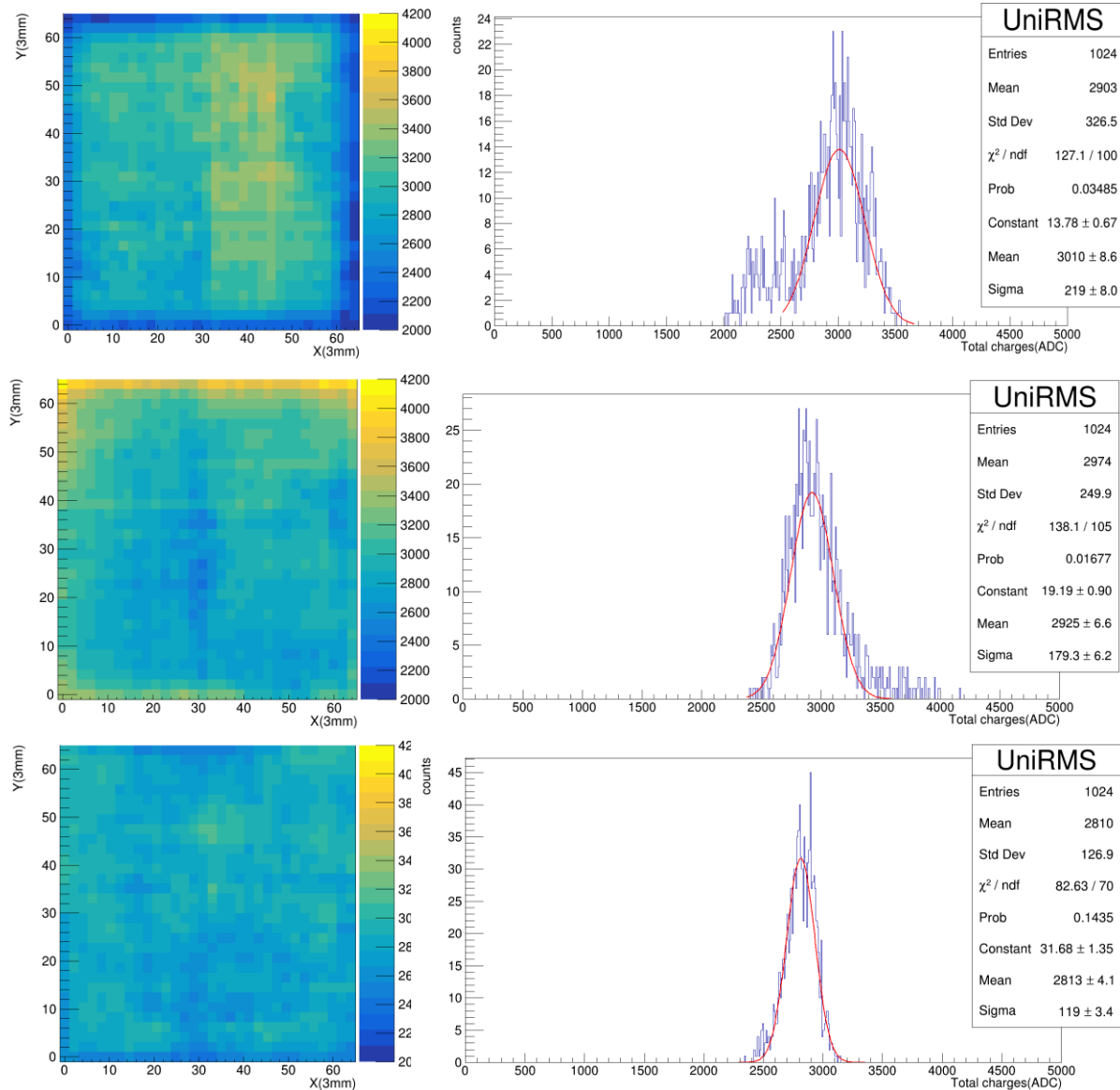
非均匀性: 11.2%



非均匀性: 8.4%

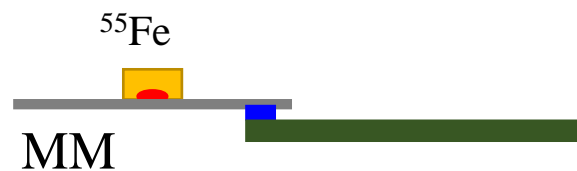


非均匀性: 4.5%

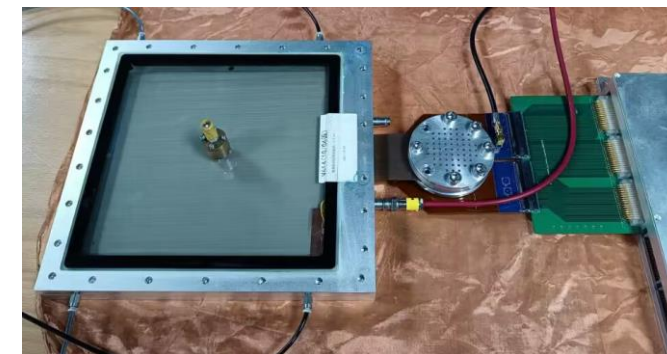


使用多道测试电子透过率、增益、能量分辨率

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

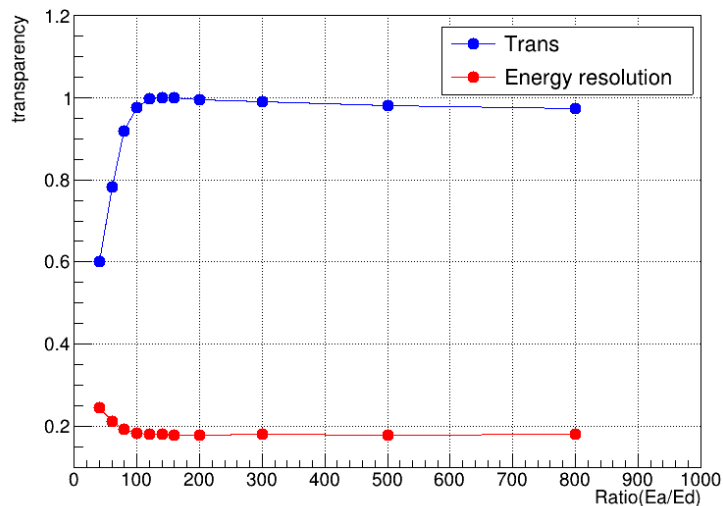


测试示意图

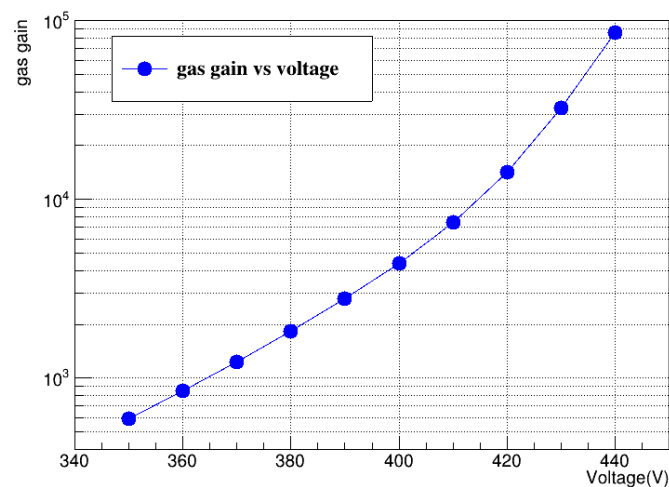


测试照片

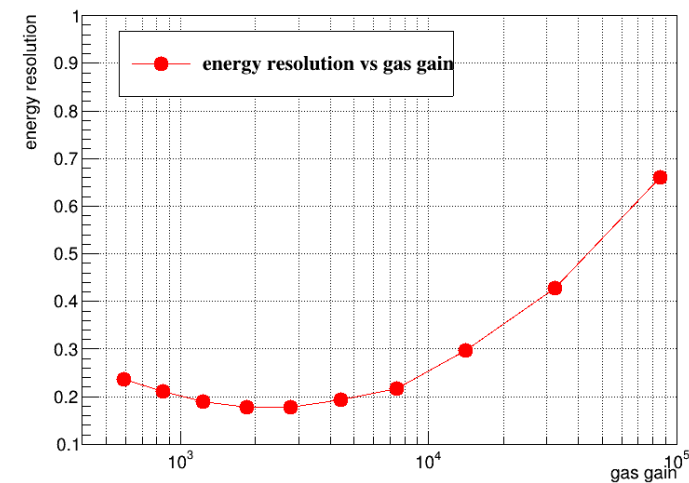
V691@77



相对电子透过率



最高增益可达 10^5



优异的能量分辨率



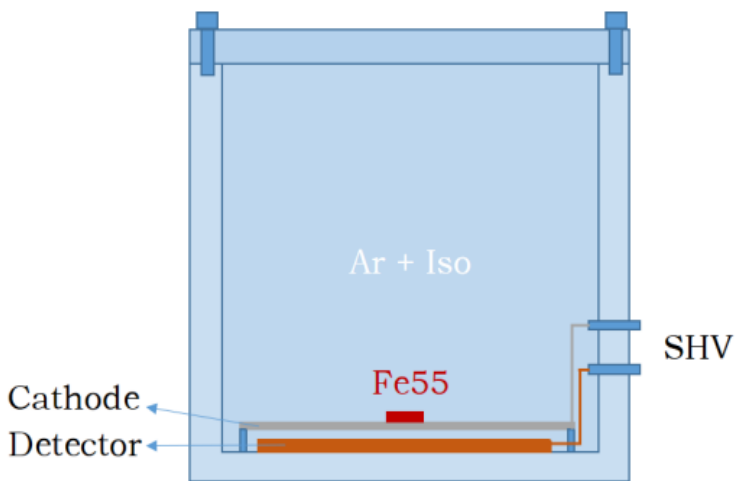
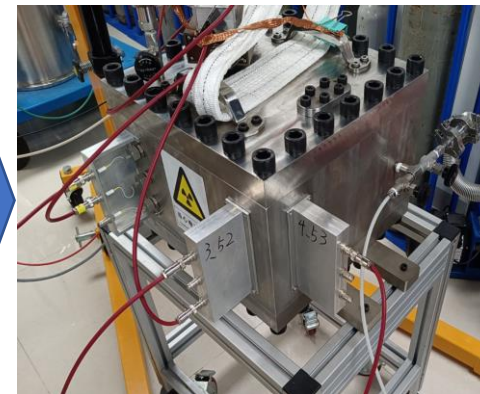
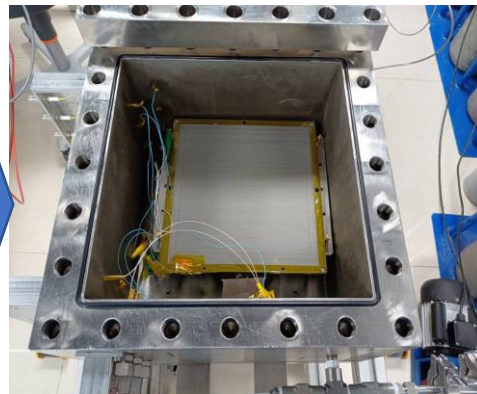
高气压测试

使用多道测试电子透过率、增益、
能量分辨率

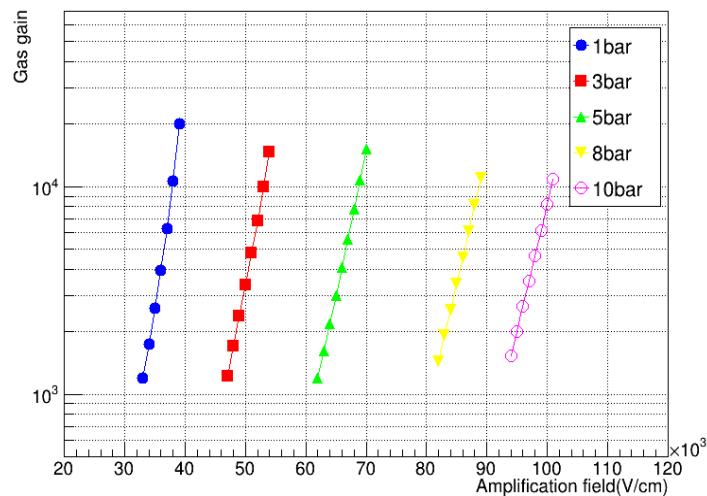
➤放射源: ^{55}Fe

➤气体: Ar+2.5% Iso

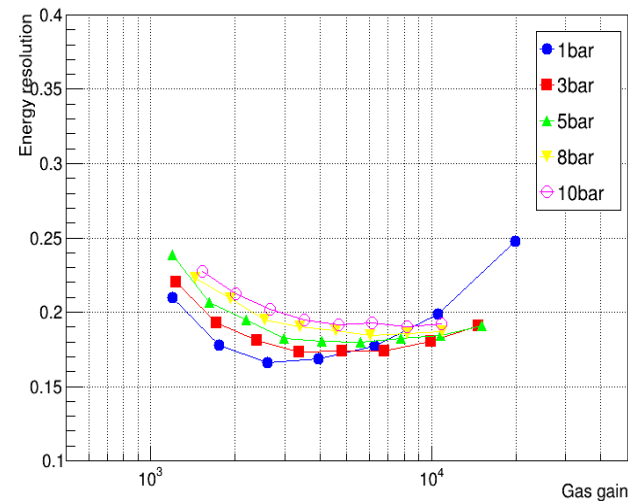
➤气压: 1 3 5 8 10 bar



高气压测试平台



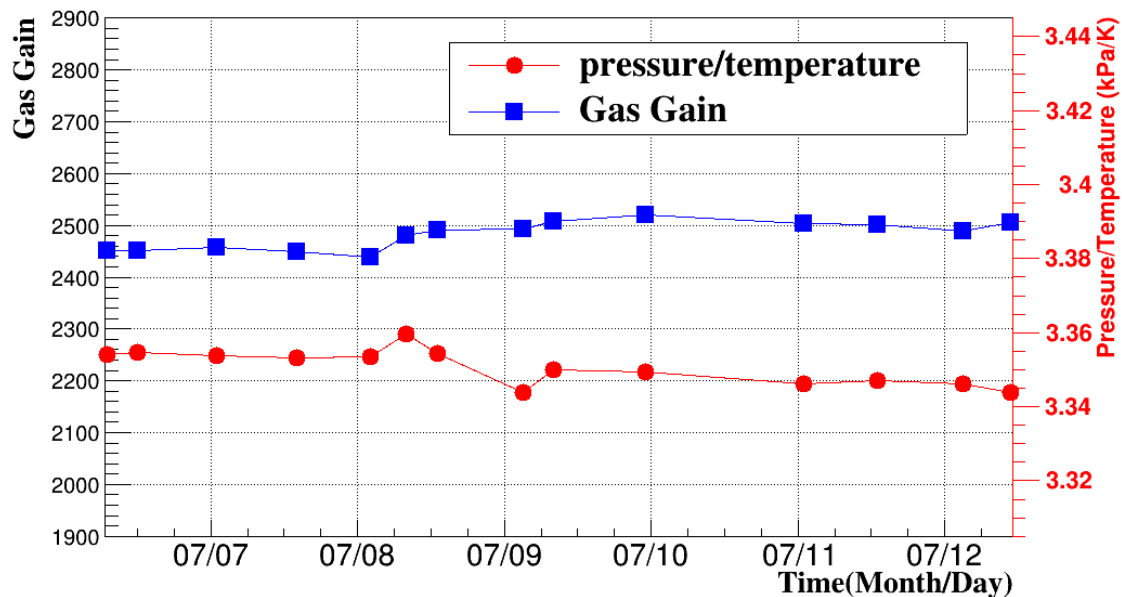
增益最高可达 10^4



能量分辨率 ~ 20%



高压下的稳定性测试

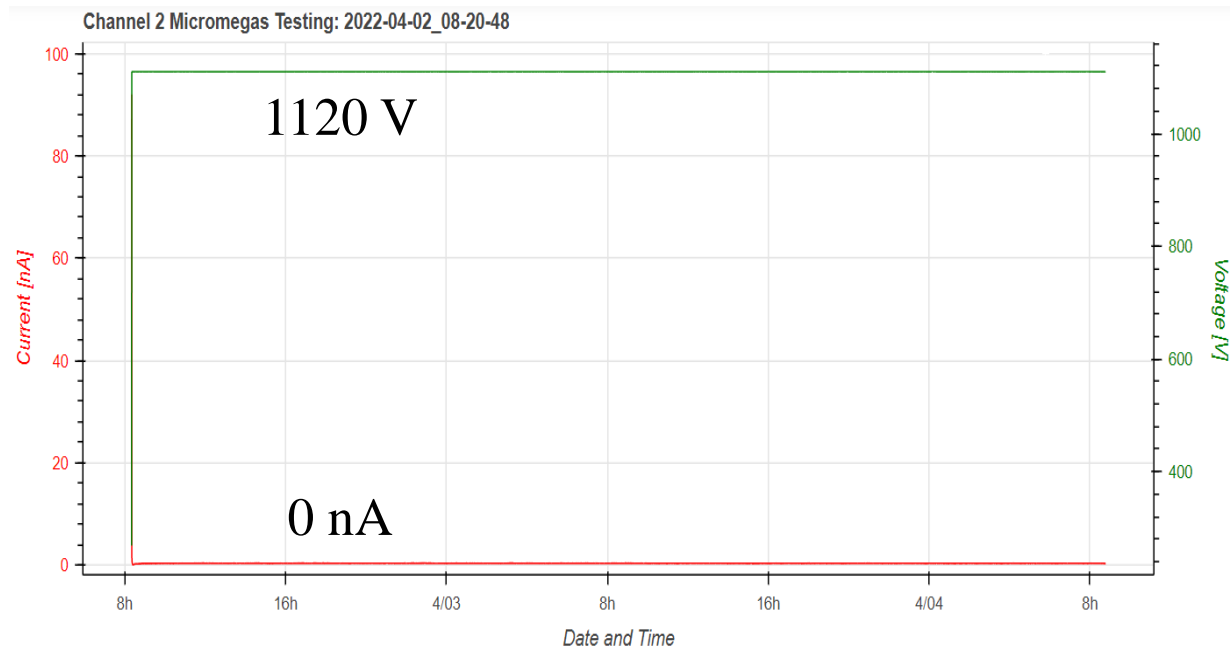


稳定运行 > 6 天

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



稳定运行 > 24 hours

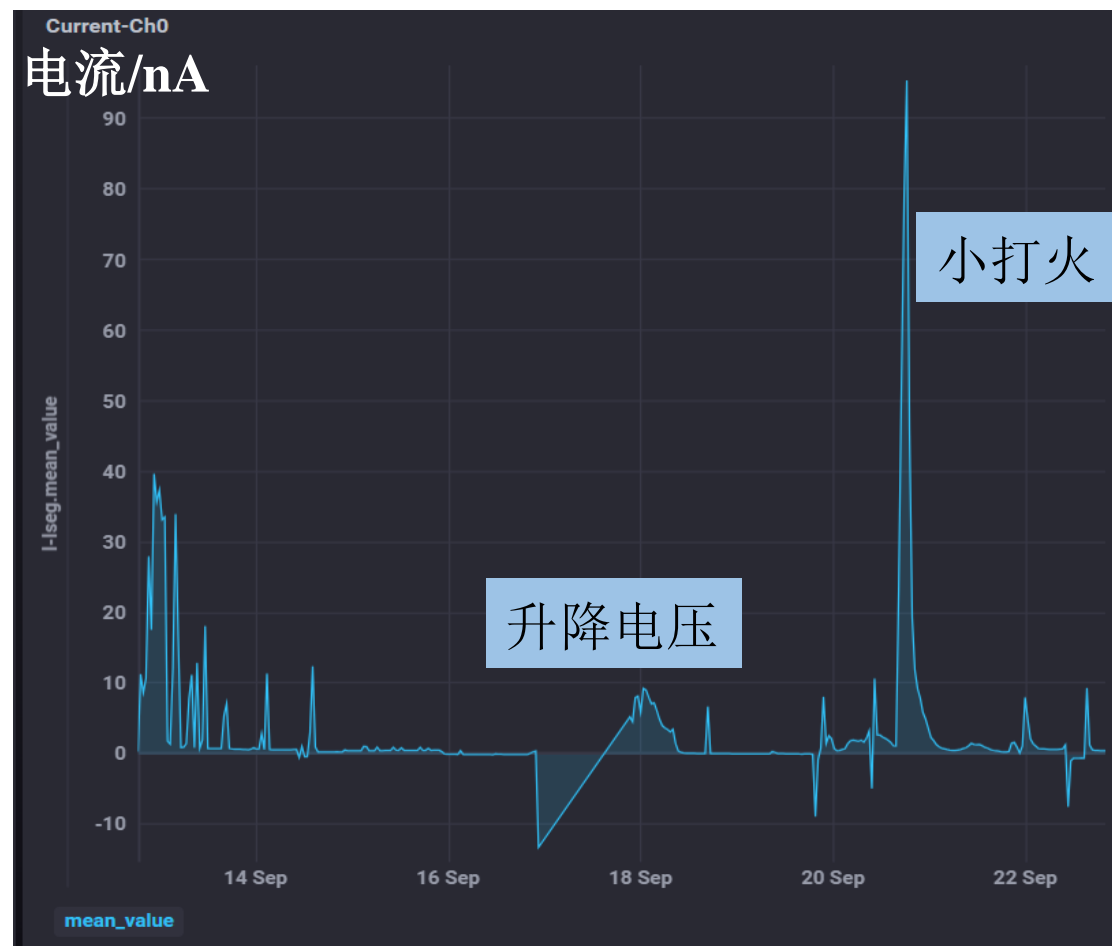
长时间电压和电流监测



高压下的稳定性测试

上海交大测试结果

- 气体: 10 bar Ar+2.5% Iso
- 电压: 990V
- 时间: ~10天
- 设备: miniTPC
- 放射源: ^{109}Cd
- 增益: ~2100



9月13日开始

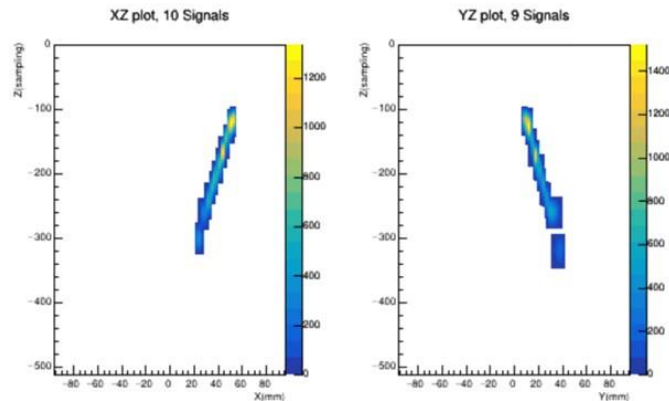
9月22日结束

虽然偶有打火，但Micromegas依旧能恢复稳定

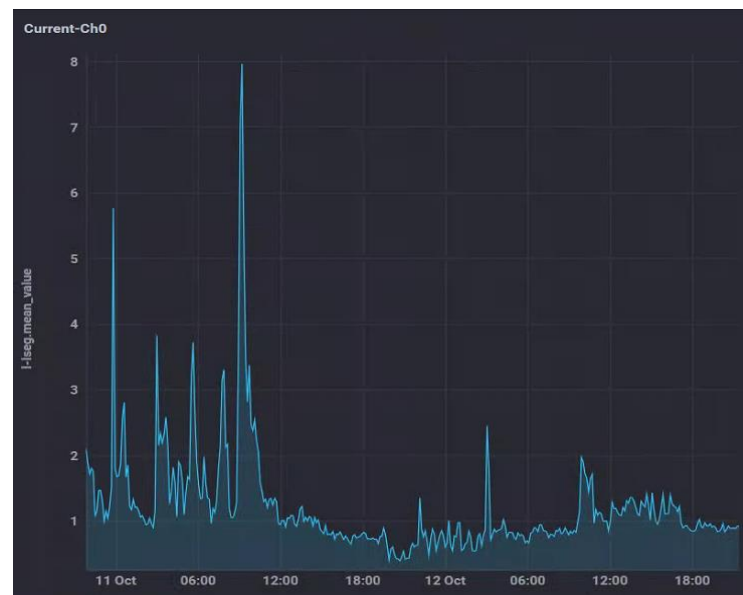
目前10bar氙气下的测试

上海交大测试结果

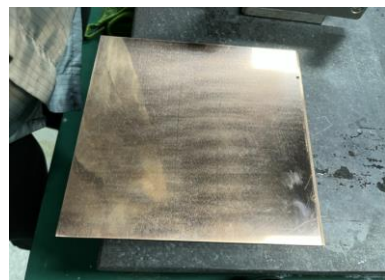
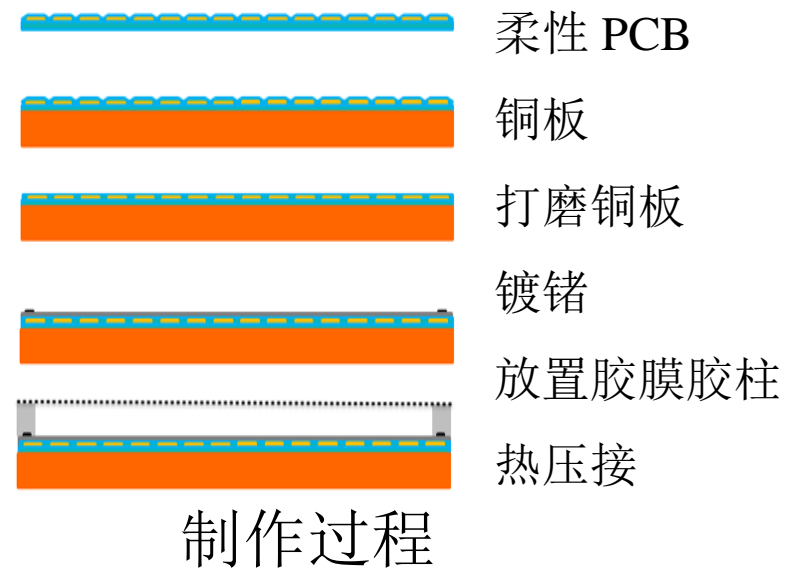
- 气体: 10 bar Xe+1% TMA
- 电压: 980V
- 时间: ~10天
- 设备: miniTPC
- 放射源: ^{109}Cd
- 增益: ~1000



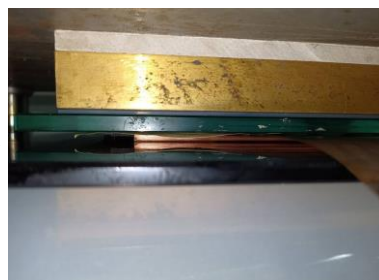
暂未看到放射源的信号，但是探测到了宇宙线 μ 子



稳定运行2天



打磨铜板



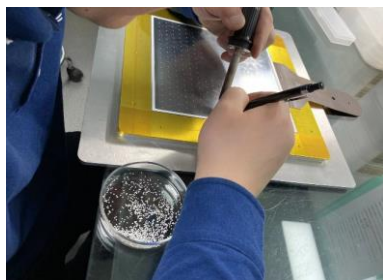
粘接PCB和铜板



打磨PCB板



镀锗

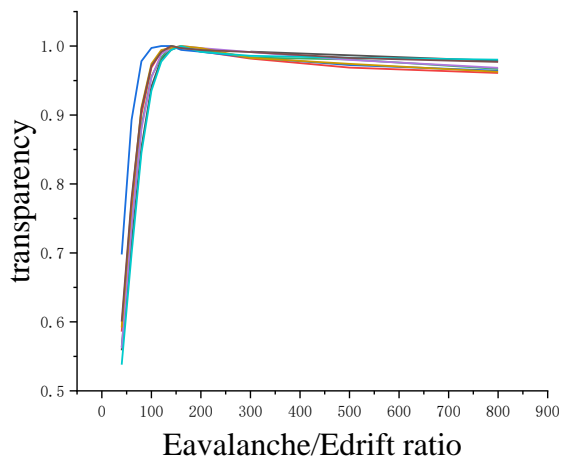
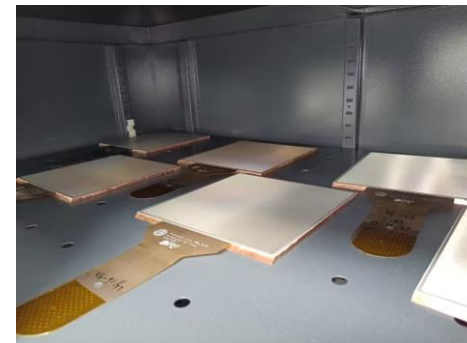
在PCB板上放置
边条和垫片

热压接

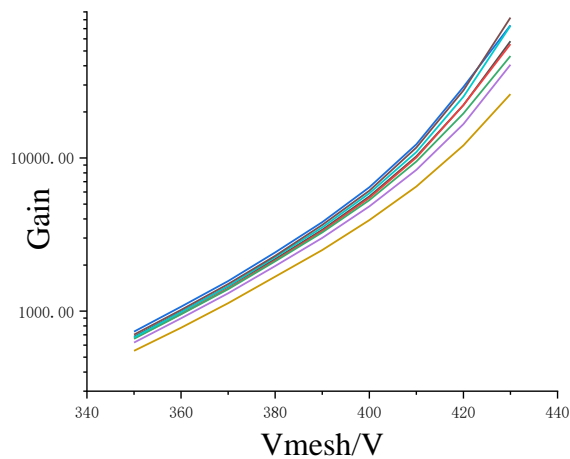
裁剪丝网
检查丝网边缘

简单测试

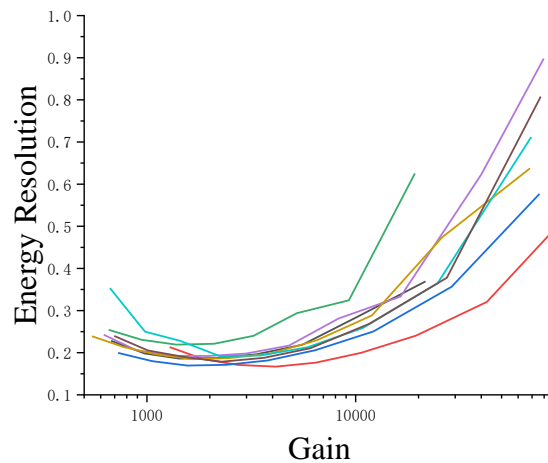
- 测试电子透过率、增益、能量分辨率
- 测试增益非均匀性
- 多数Micromegas的性能表现具有一致性
- 质量控制是合格的



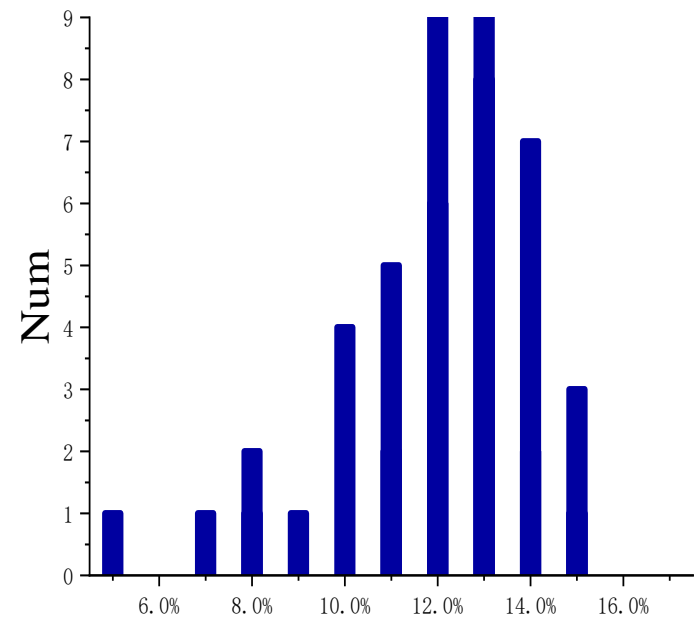
电子透过率



增益



能量分辨率



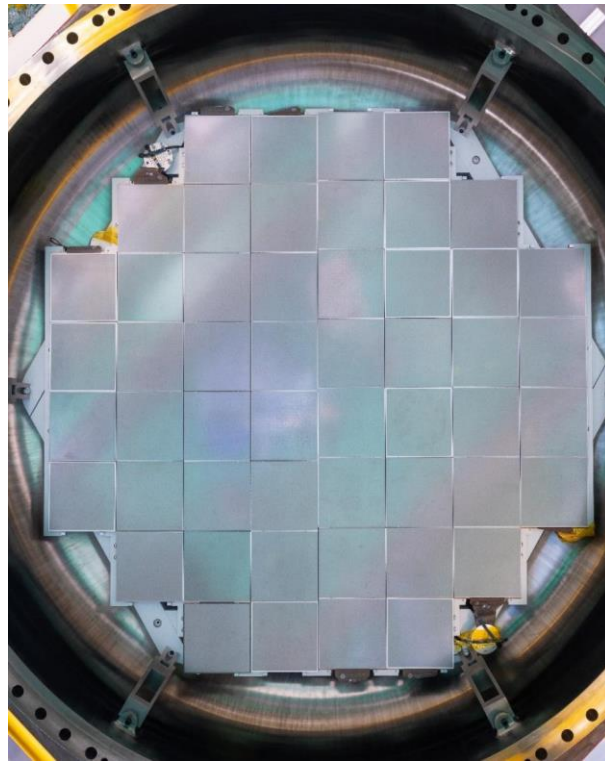
Uniformity of 52 MMs

增益非均匀性

➤ 52块Micromegas已经在位于上海交大的Full TPC上完成试安装



正在安装



读出平面
(52块Micromegas)



试安装完成



总结

- 中国科大研究的热压接技术在低本底高能量分辨实验中是一个很有竞争力的方案
- 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
- 52块 Micromegas已在TPC上完成试安装

- Micromegas高气压长时间运行稳定性问题正在尝试解决
- 10bar氙气测试正在开展

Thanks for listening