

The Progress of THGEMs at IHEP

谢宇广

牛顺利、赵航、胡涛、吕军光等

高能物理研究所

核探测与核电子学国家重点实验室

2015-07-23

主要内容

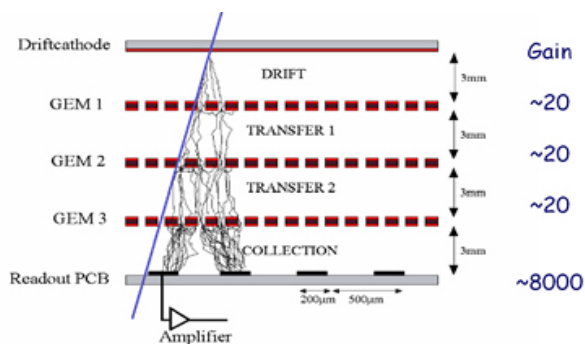
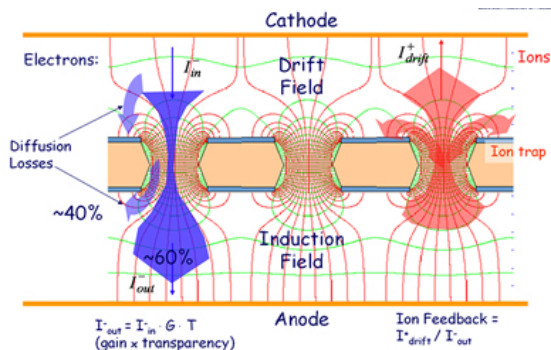
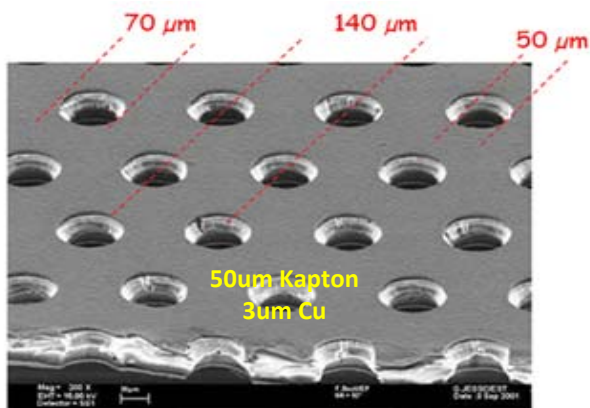
- 厚GEM简介
- 新基材厚GEM研究
- 高位置分辨厚GEM研究
- 大面积厚GEM研究
- 厚GEM应用
- 总结

厚GEM简介

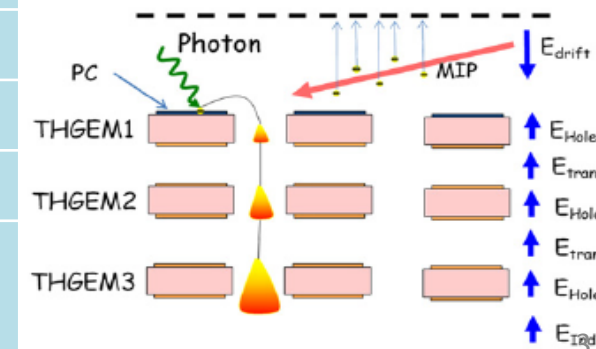
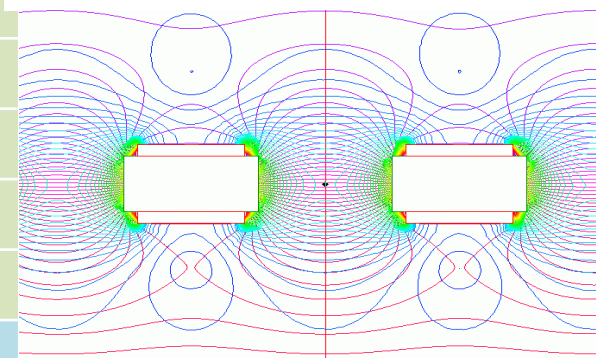
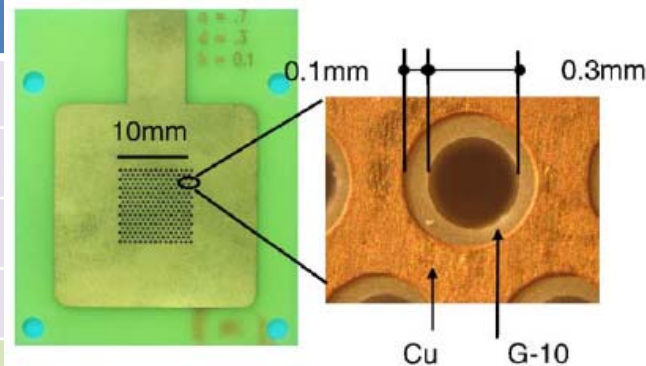
- GEM(Gas Electron Multiplier)
- 气体电子倍增器 (1997 by F. Sauli)



- THGEM(Thick Gas Electron Multiplier)
- 厚GEM (2004 by A. Breskin)



GEM	项目	THGEM
50	T/um	≥ 200
70	D/um	≥ 200
140	P/um	≥ 500
10	Rim/u	≥ 20
$\sim 10^3$	GainS	$\geq 10^4$
$\sim 10^4$	GainD	$\geq 10^5$
$< 20\%$	$\sigma E(\text{FWHM})S$	$\sim 20\%$
$\sim 25\%$	$\sigma E(\text{FWHM})D$	$\sim 30\%$
$< 200u$	σX	$< 500u$
High	Tech	Normal
High	Cost	Low
Fragile	Durability	Robust
Good	Stability	+++
Kapton	Substrates	FR-4, PTFE, Ceramic, Kapton



新基材厚GEM研究

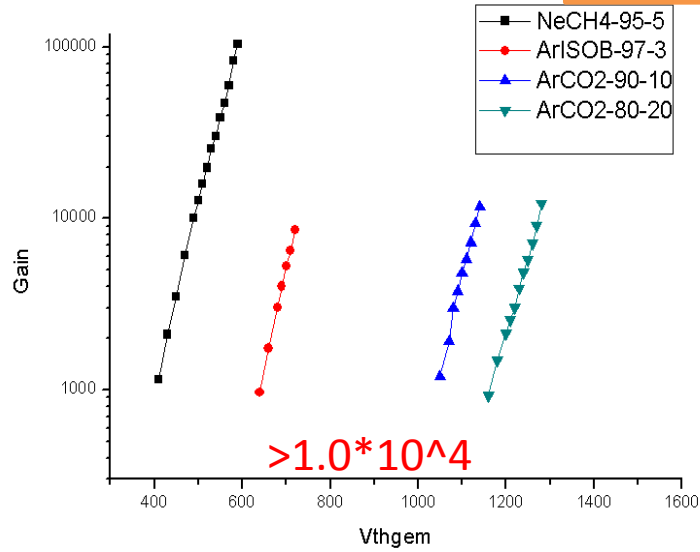
不同基材特点

基材	FR-4	Ceramic	PTFE (Teflon)	Kapton (PI)
材料对比				
厚度	0.1-3.2	0.06-1	0.2-3	0.01-0.5
电气特性	通用	高频传输	抗腐蚀、高低温	电绝缘
机械性能	刚、韧性好	较脆	韧性好,	柔韧
成本	便宜	较高	较高	较高
性能对比: 空气打压, Ar+IsoB: 97-3, 120小时测试				
耐压/V	1400	1200	1600	1800
单层增益	8.0×10^3	5.0×10^3	1.0×10^4	1.0×10^4
稳定性	良好	稍弱	良好	良好
应用对比				
中子探测	V_V	^ ^	V_V	V_V
低本底实验	V_V	^ ^	^ ^	- -
大面积/m ²	^ ^	V_V	^ ^	^ ^

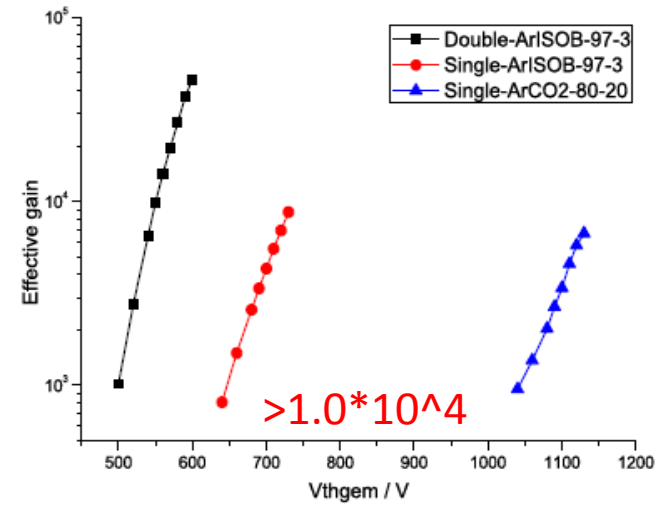
因此说, 目前并没有一种完美的材料能同时满足不同应用的需求, 不同应用场合应该选择合适的材料。

不同基材性能展示

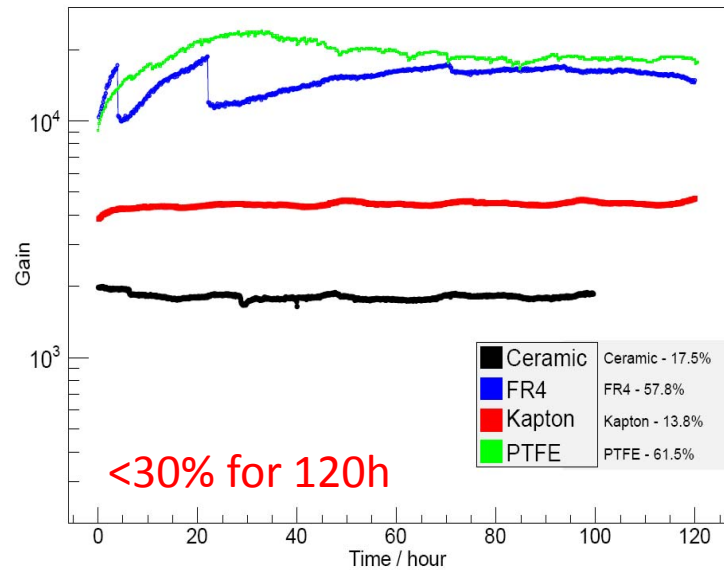
Ceramic



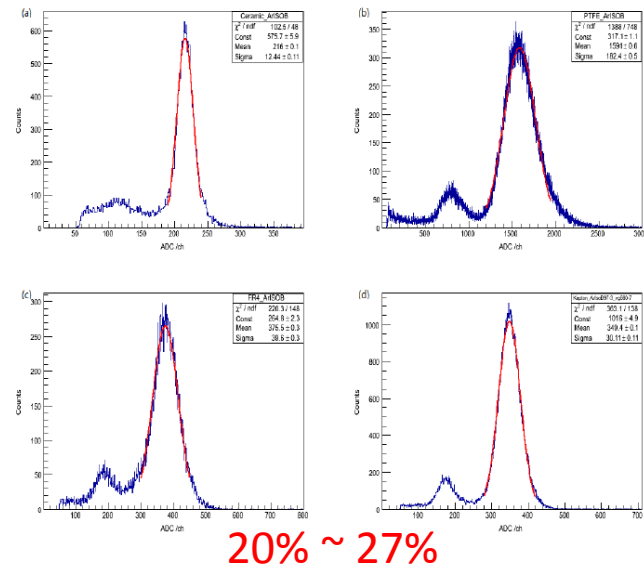
Kapton



Longterm gain



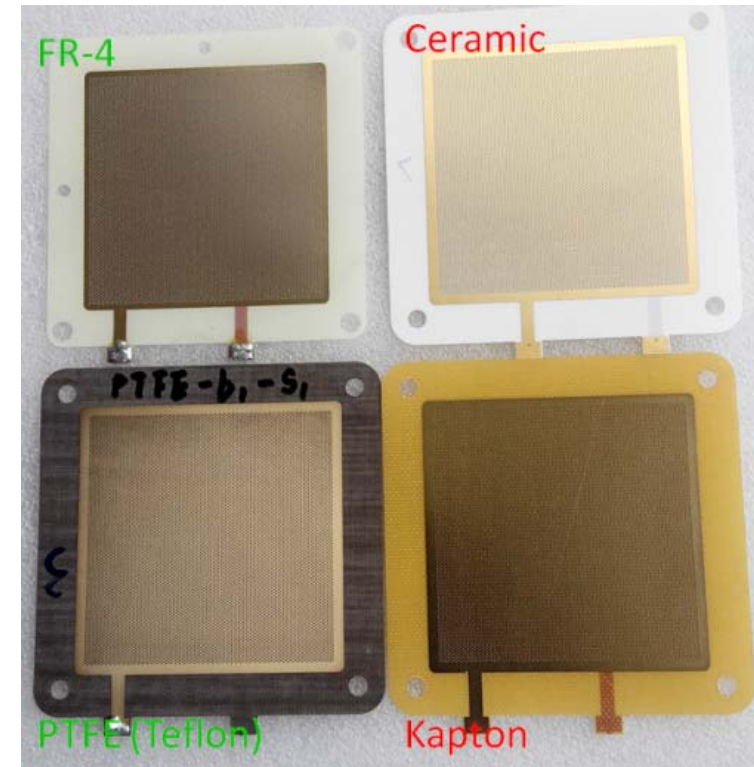
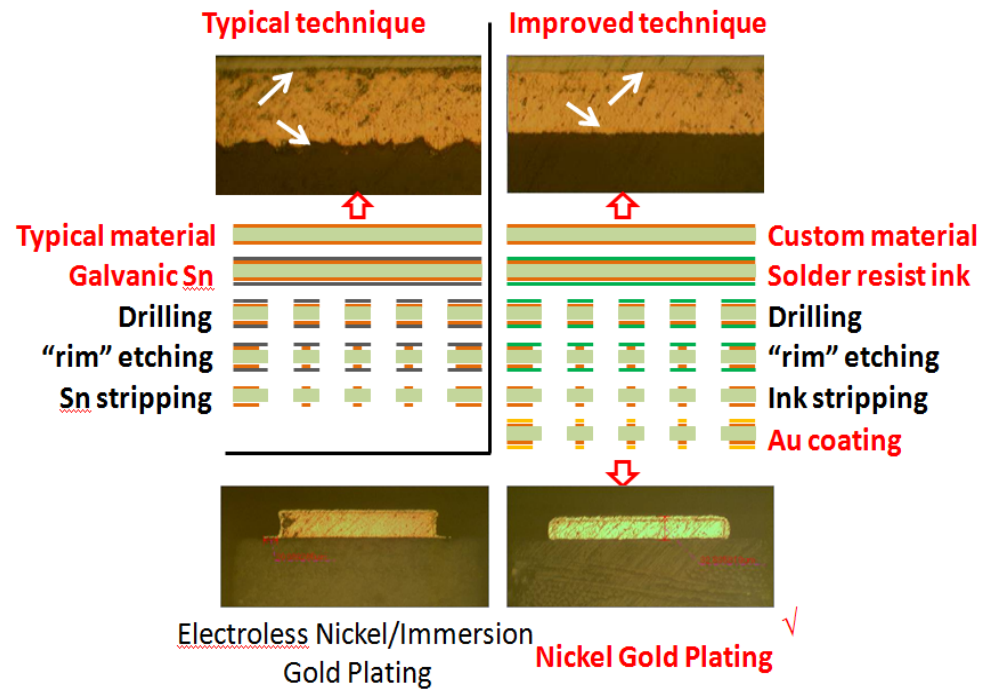
Energy resolution



20% ~ 27%

Figure 12: The energy resolution of THGEMs, Ar + iC4H10 = 97:3. (a) Ceramic substrate single layer, 13.6%(FWHM), gain= 2.1×10^3 (b) PTFE substrate single layer, 27.0%(FWHM), gain= 1.6×10^4 (c) FR-4 substrate single layer, 24.0%(FWHM), gain= 3.8×10^3 (d) Kapton substrate single layer, 20.2%(FWHM), gain= 3.4×10^3 .

■ 高能所不同基材厚GEM制作能力

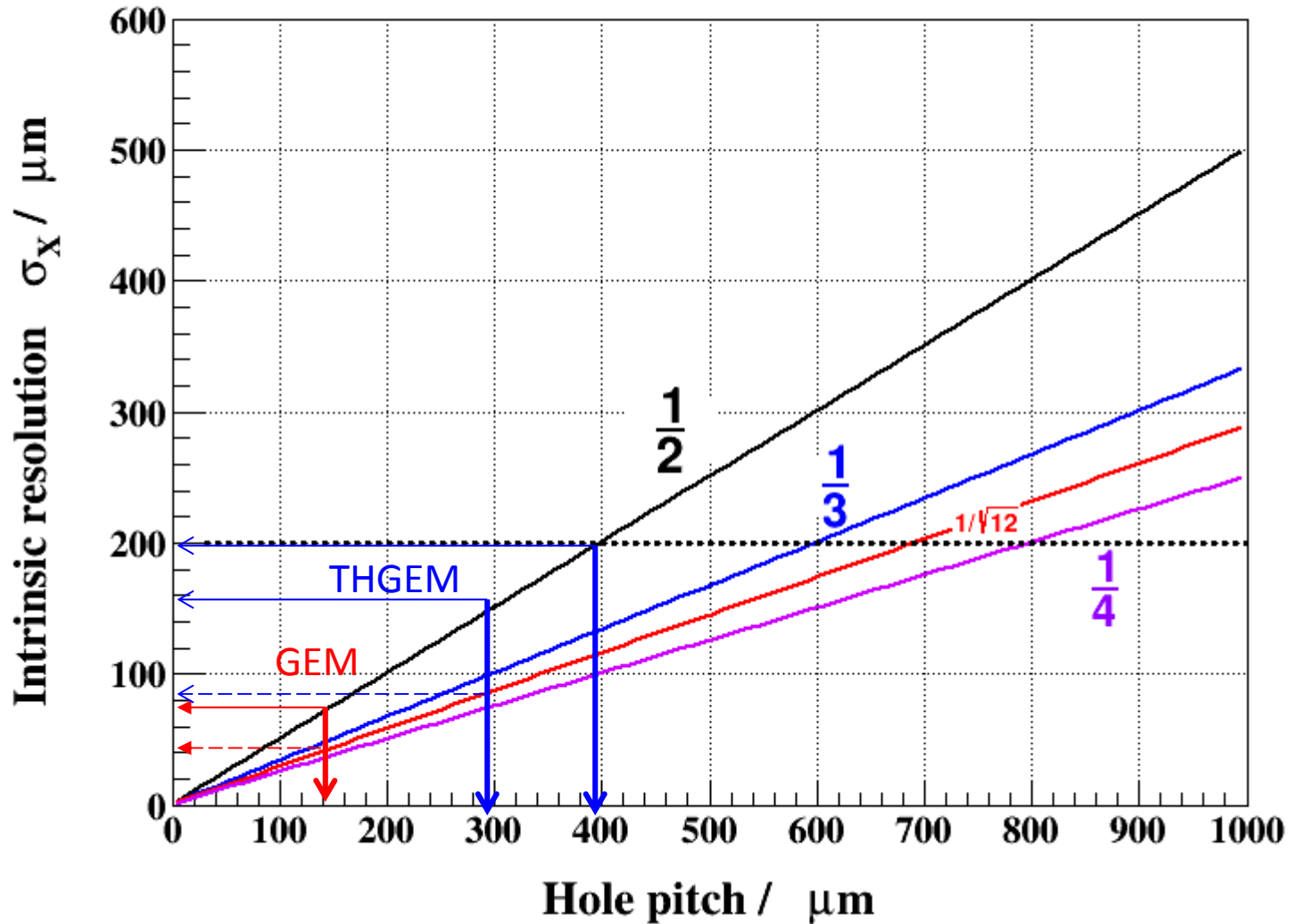


机械钻孔专利已授权

基材	灵敏面积/m ²	孔径/mm	孔间距/mm	厚度/mm	货期/天
FR-4	<=0.5*1.0	0.15~0.3(0.2)	>=0.4 (0.6)	0.1~0.3(0.2)	20
PTFE (Teflon)	<=0.5*1.0	0.15~0.3(0.2)	>=0.4 (0.6)	0.1~0.3(0.2)	30
Kapton	<=0.5*1.0	0.15~0.3(0.2)	>=0.4 (0.6)	0.05~0.3(0.2)	30
Ceramic	<=0.5*0.5	0.15~0.3(0.2)	>=0.4 (0.6)	0.1~0.3(0.2)	30

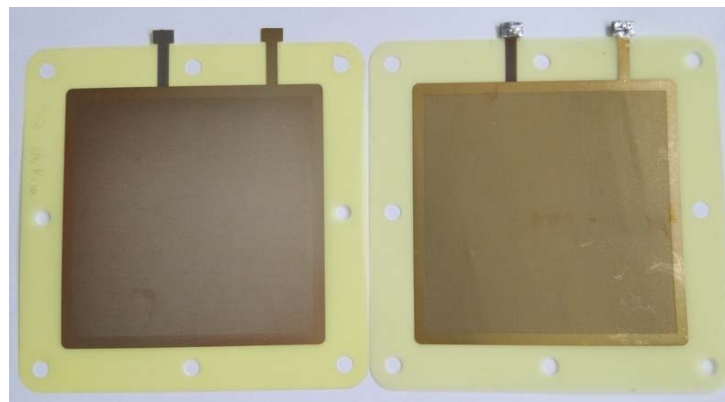
高位置分辨厚GEM研究

厚GEM的位置分辨不高被认为是主要缺点之一。标准的厚GEM孔径0.2，孔间距0.5mm，本征位置分辨为144 μm 。仍认为不够好。提高位置分辨的唯一办法是减小孔间距。



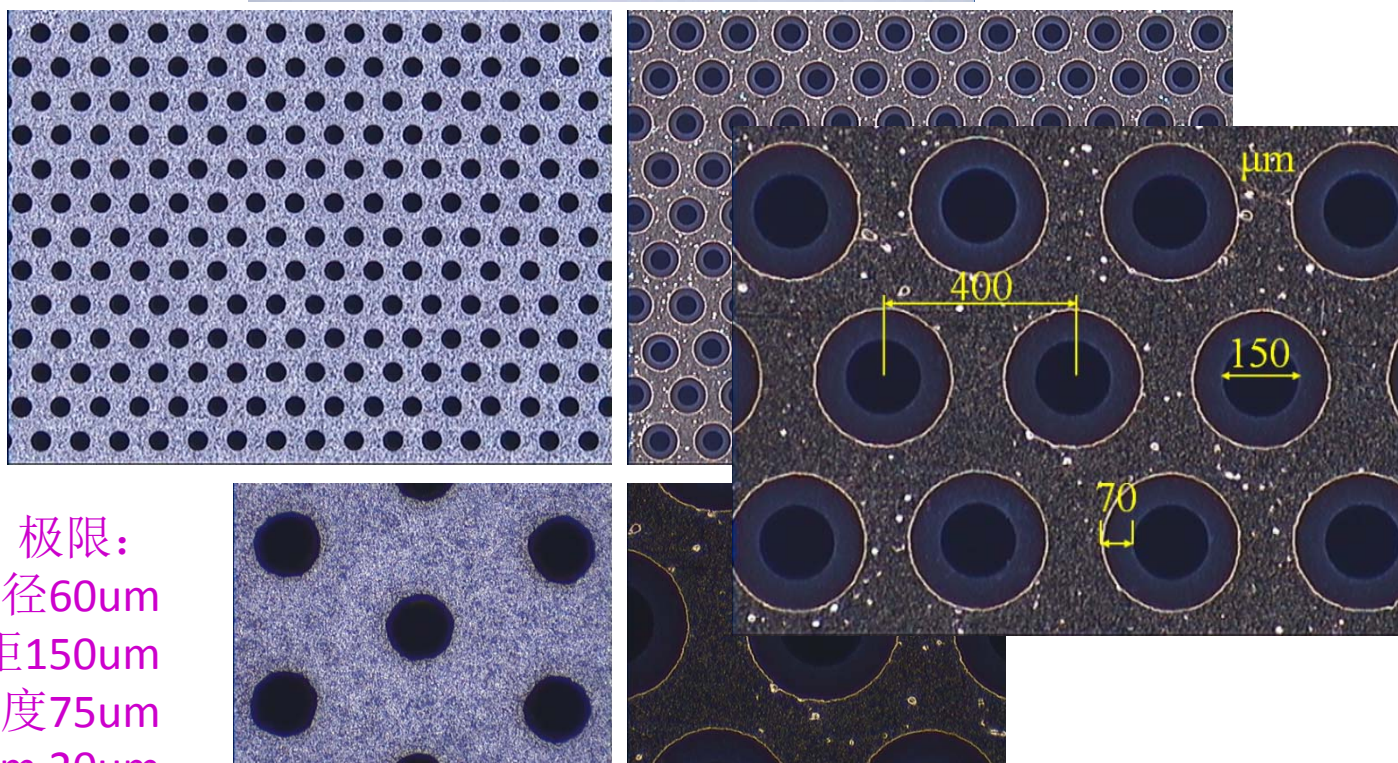
激光打孔

已制作
孔径100um
孔间距300um
厚度100um
Rim 20um
本征分辨87um



机械打孔

极限
孔径150um
孔间距400um
厚度100um
Rim 70um
本征分辨116um



极限：
孔径60um
孔间距150um
厚度75um
Rim 20um
本征分辨43um

大面积厚GEM研究

■ 大面积微结构气体探测器

大面积厚GEM和批量生产的制作能力是厚GEM实际应用的必然要求。大面积MPGD制作情况：

	2012	目标
GEM:	1.2m*0.5m (国外)	2.0m*0.5m (国外)
Resistive Micromegas	2m ² (国外)	3.4m*2.2m (国外)
THGEM	0.6m*0.6m (国外)	1.0m*0.5m (国内)

■ 技术困难和途径

困难：传统机械钻孔厚GEM制作工艺，主要问题是费时。这是不可回避的问题，因为孔是一个个钻出来，典型的孔密度为3.2个/mm²（孔间距0.6mm），当面积>0.2*0.2m²时，单片孔数量>12500个，钻孔速度只能达到200孔/分钟，单片就需要>63分钟，即一小时。0.5*0.5m²就需要6个多小时。

途径：

1. 激光打孔技术

打孔效率高，精度高，孔径和孔间距可以达到很小。

2. 化学腐蚀技术

在厚GEM制作上还没有见到实际尝试，不同于传统GEM。

■ 机械钻孔大面积

虽然机械钻孔很费时，但是目前仍是大面积厚GEM制作的可靠办法。若不暂不考虑批量制作的困难，小批量的大面积厚GEM，机械钻孔是完全可能的。

受限于数控钻床本身的可加工尺寸和PCB生产线宽度的限制，可能的最大单元面积为 $1.2*0.5m^2$ 。

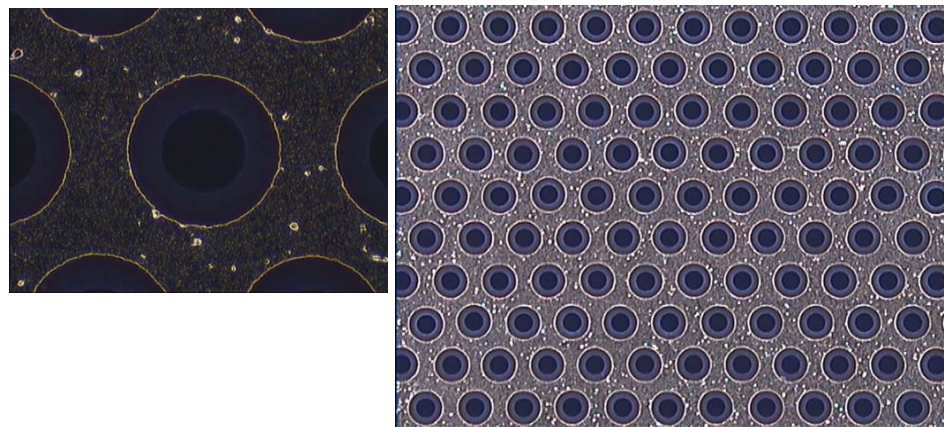


机械钻孔精度：

普通：孔径**200um**，孔间距**500um**

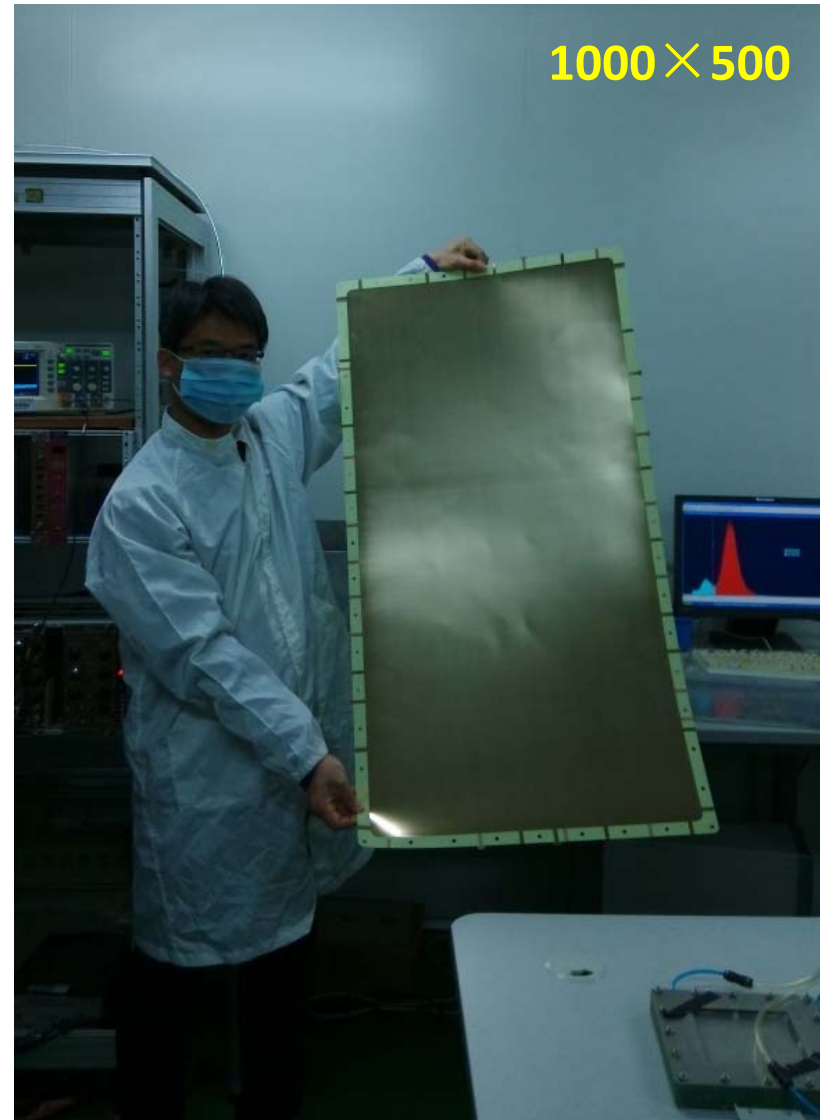
极限：孔径**150um**，孔间距**400um**

实际上许多应用中，要求单膜大面积的同时，并不要求孔间距很小，而是mm水平的孔间距即可，这使得机械打孔大面积厚GEM的制作成为可能。



试制了两种大面积机械打孔厚GEM，绝缘环80um。

500×500，孔径0.3，孔间距1.0mm，单膜耗时：连续8.55小时！
1000×500，孔径0.3，孔间距1.5mm，单膜耗时：连续9.62小时！



■ 激光打孔大面积

特点：精度高、打孔快速，综合发挥激光打孔，激光显影，激光对位技术优势。

此技术也可应用于GEM膜制作，CERN未发展此技术，代之发展了化学腐蚀技术。
日本有基于激光打孔的GEM膜。国内可加工最大单膜有效面积： $1.2 \times 0.5m^2$ 。

•GEM

- Laser, plasma, chemical
- Single mask, double mask
- NS2 assembly
- Mass production / industrialization status

•Micromegas

- STD, BULK
- Protection resistor : foils, groove filling, printed, vacuum deposited
- Mass production / industrialization status

•Micromegas microbulk

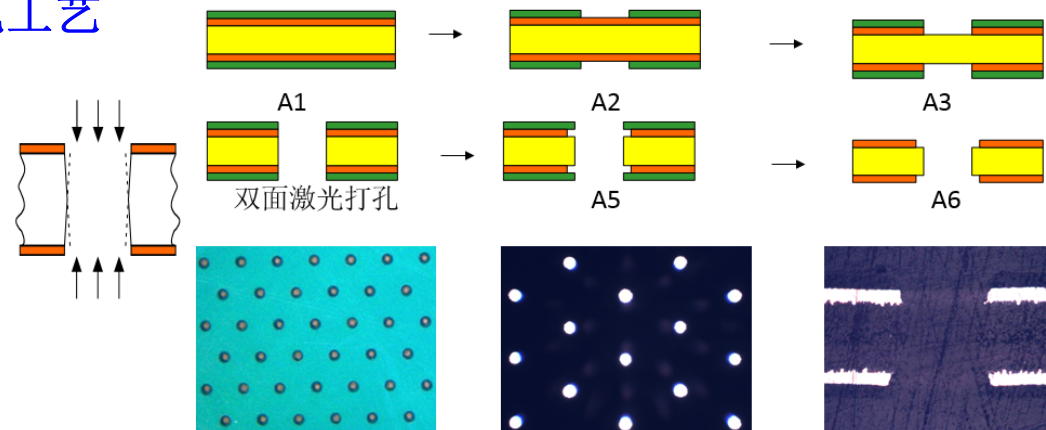
- std, X/Y, Low mass

•THGEM

- Last improvements, Pashen curve guide
- Large size and industry production status

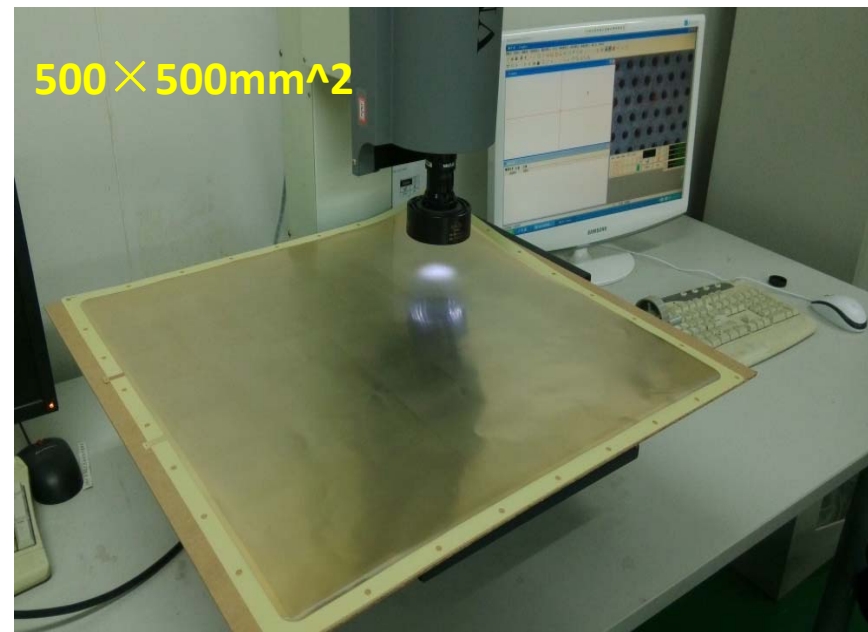
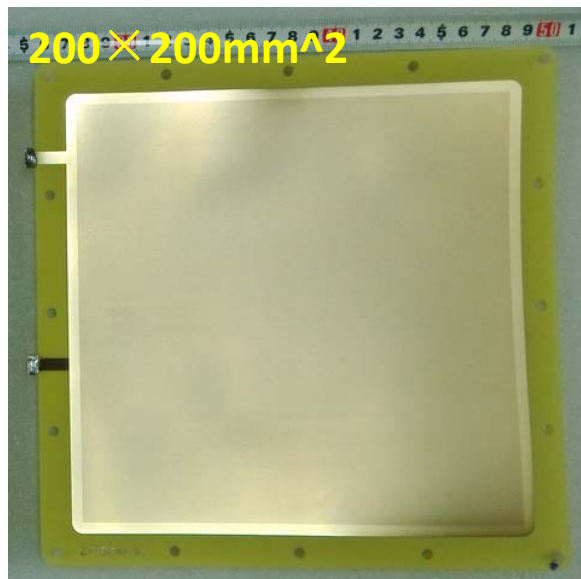
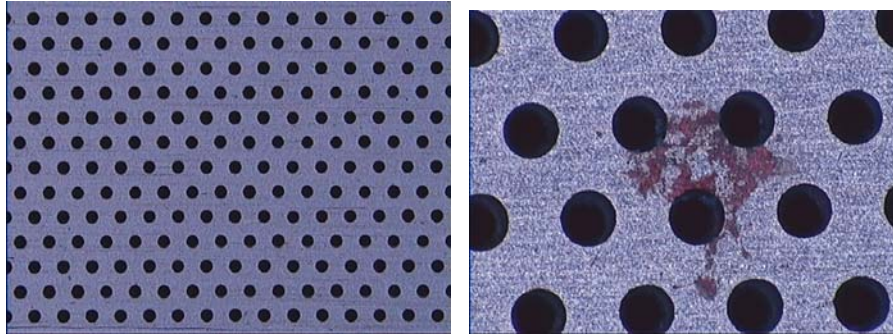


■ 双面激光打孔工艺



■ 激光打孔样品

60×60、100×100，200×200及500×500mm²的样品，200×200以下性能良好，但是成品率有待提高，大面积样品需要更多改进。

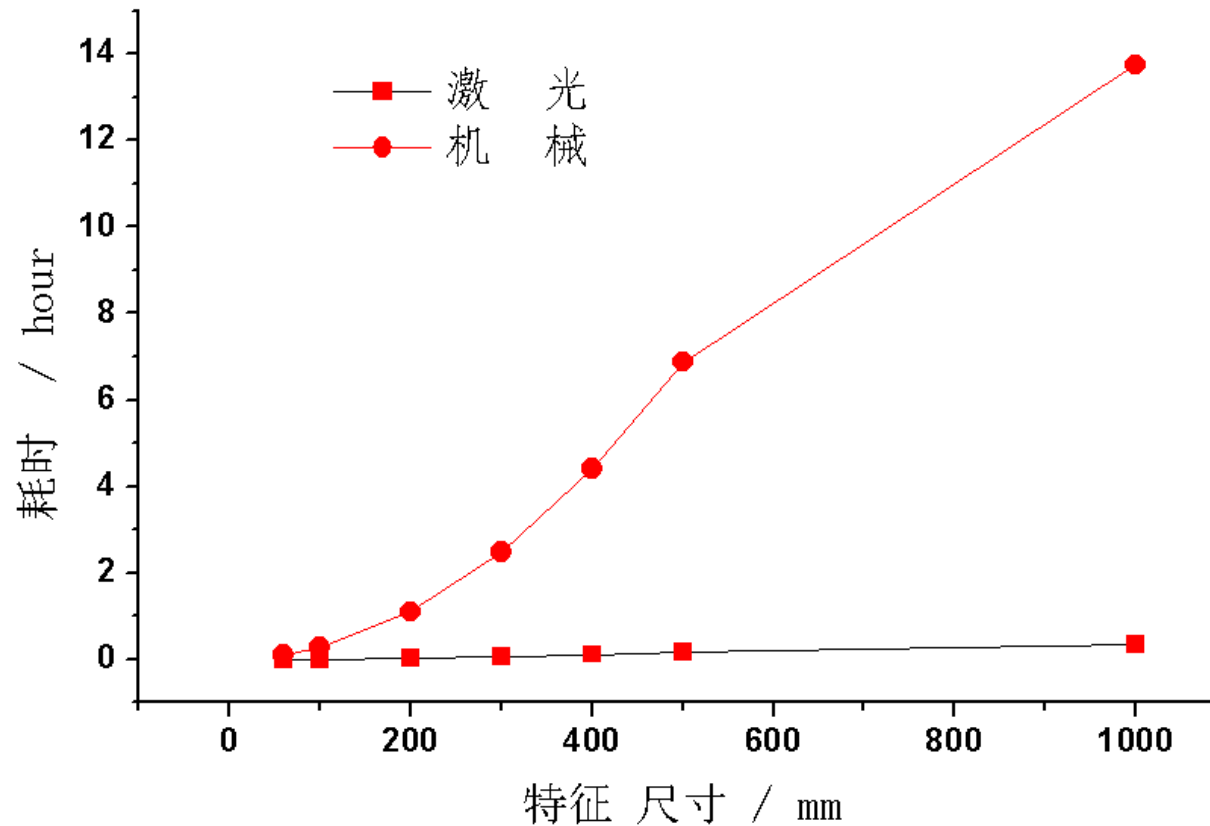


■ 激光打孔和机械钻孔速度对比

激光：0.10mm，300h/s, 18000h/min

机械：0.15mm, 200h/min; 0.2mm, 350h/min; 0.25mm, 500h/min;

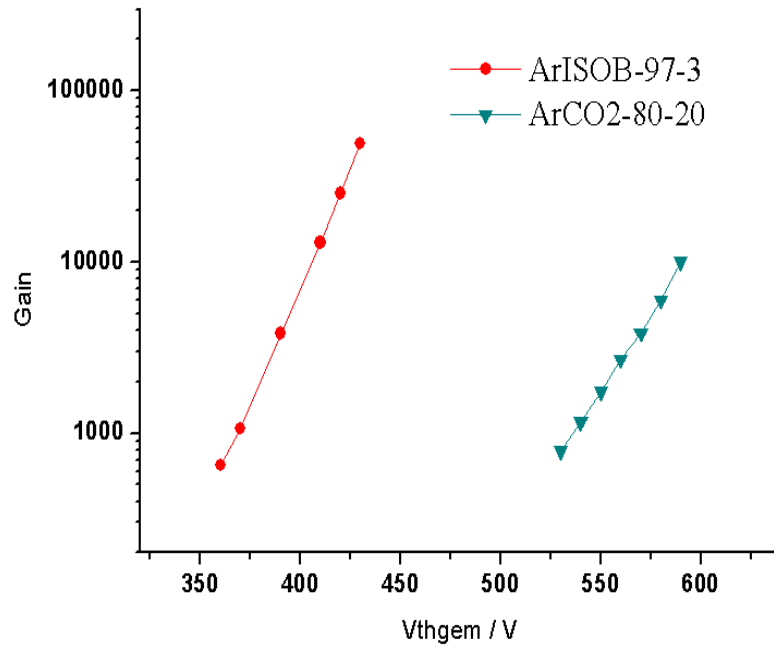
以激光膜，孔0.10mm，孔间距0.3mm，机械膜，孔0.2mm，孔间距0.5mm



■ 激光打孔厚GEM性能（小面积）

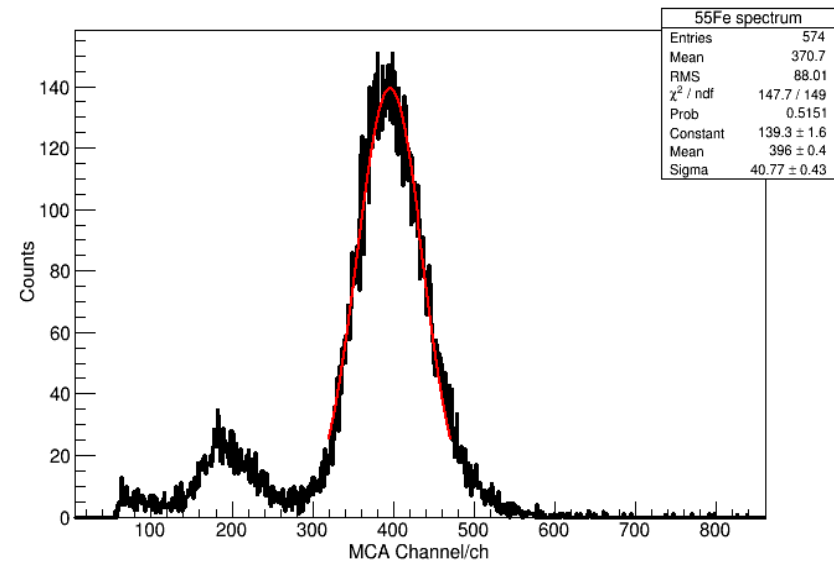
Laser THGEM, double layer

增益



> 1×10^4 @ ArCO2=80:20
> 5×10^4 @ ArISOB=97:3

能量分辨

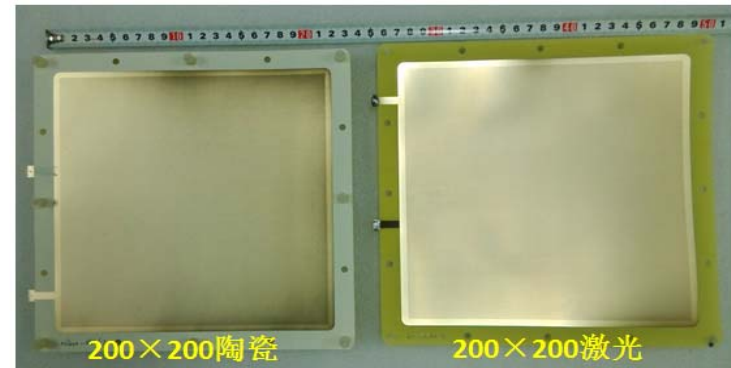
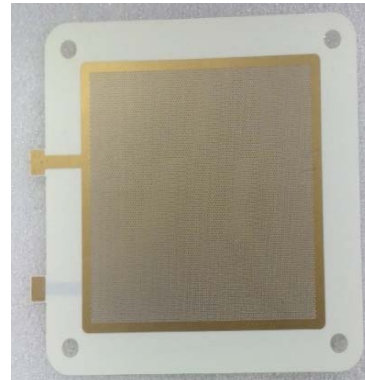
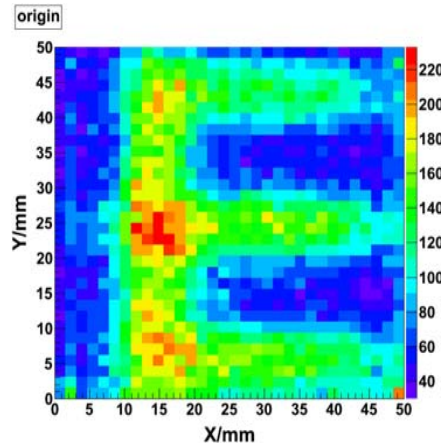


24% @ gain = 4×10^3

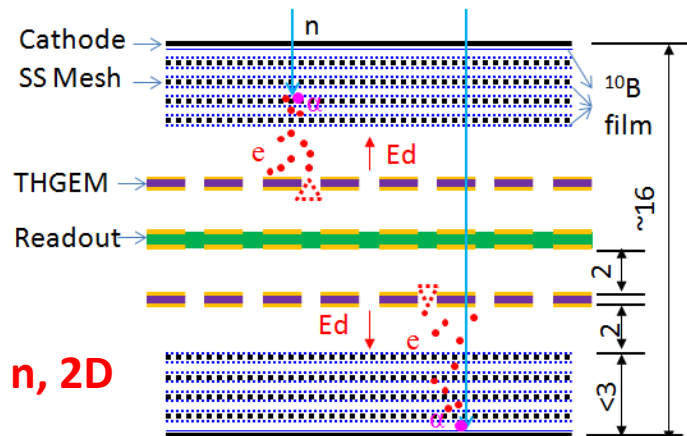
厚GEM应用

一、涂硼中子探测

- **散裂 (CSNS) :** 陶瓷THGEM, 低中子吸收, 成功研制 $200 \times 200 \text{mm}^2$ 中子专用陶瓷GEM膜, 已提供多批各规格陶瓷膜, 性能良好, 成品率有待提高。详见周健荣报告。



- **新型中子探测器:** 1. 以多层漂移极镀硼代替多层厚GEM镀硼, 只需单层THGEM; 2. 以双面感应板来实现相同电子学路数下的效率提高。



Be: 2um

- Cathode: FR4 0.4mm
- SS: Steel 0.05mm
- THGEM: FR4 0.3mm
- ReadOut: FR4 0.5mm
- 硼膜: 2um
- 探测器尺寸: 5X5cm
- 热中子个数: 100000
- 能量 = 0.0253eV

G4 模拟

➤ 模拟结果说明:

1. 初步模拟给出无孔网情况下，转换出进入工作气体区域的带电粒子比率；
2. 需要考虑孔网透射率对镀膜面积的影响，以及孔网对电子收集效率的影响；
3. 以0.2孔径，0.4孔间距孔网来看，透过率为22.67%，假设每层对电子收集效率的影响为20%（因为重离子原初电子很多，影响应当不会很高）来修正。

Layer	Tratio	Lratio	Allratio	alpha / %		Li7 / %		e- / %
				Simulation	Corrected	Simulation	Corrected	Simulation
1	0	0	1	3.0161	3.0161	1.4235	1.4235	0.1104
2	0.22673	0.2	0.61862	5.2617	3.254992854	2.5126	1.55434461	0.3099
3	0.22673	0.2	0.61862	4.3121	2.667551302	2.0729	1.2823374	0.3
4	0.22673	0.2	0.61862	3.5817	2.215711254	1.7157	1.06136633	0.2891
5	0.22673	0.2	0.61862	2.9802	1.843611324	1.404	0.86854248	0.2504
6	0.22673	0.2	0.61862	2.393	1.48035766	1.1193	0.69242137	0.177
7	0.22673	0.2	0.61862	1.9312	1.194678944	0.891	0.55119042	0.1833
8	0.22673	0.2	0.61862	1.5753	0.974512086	0.731	0.45221122	0.1576
9	0.22673	0.2	0.61862	1.2812	0.792575944	0.5876	0.36350111	0.1406
10	0	0	1	0.5238	0.5238	0.2563	0.2563	0.0374
Sum				26.8563	17.96389137	12.7139	8.50571494	1.96

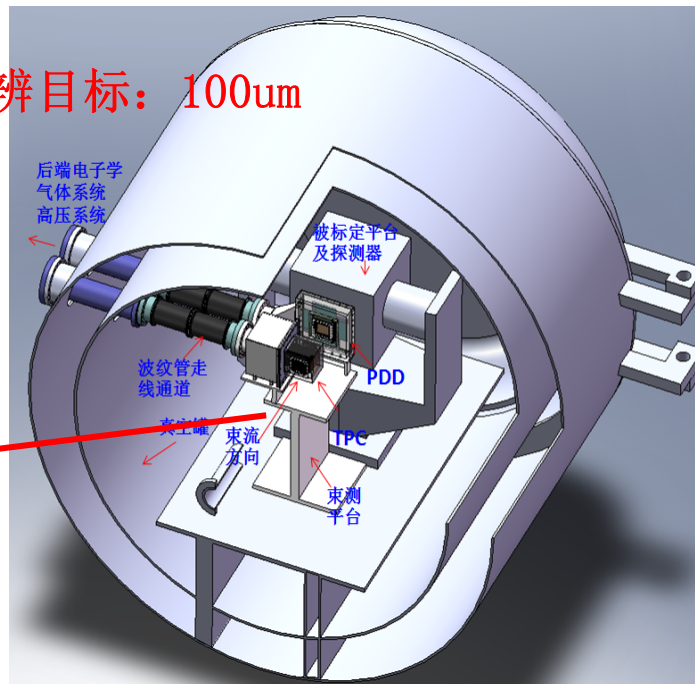
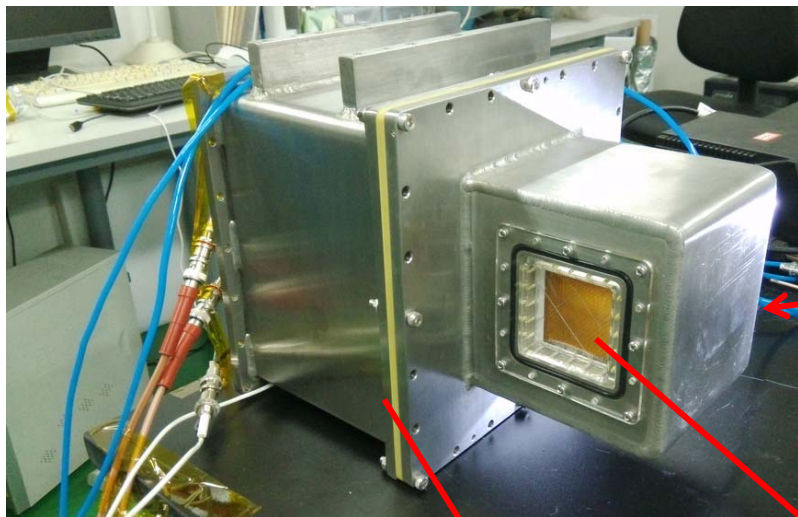
➤ 模拟结果分析:

1. 单侧5层、对称10层结构，通过alpha的最大中子探测效率为18%。
2. 由于中子入射方向的影响，各层探测效率并不一致，且不是转换效率的简单累加
3. Li7同样有较大比例进入工作气体，且同样能够产生有效探测，其贡献的中子探测效率为8.5%。因此总的中子探测效率有望达到26.5%。
4. 中子产生的电子约2%，区别于光子转换的电子本底。此部位也应略微有贡献。7

二、粒子径迹和位置探测器

➤ 粒子径迹探测器：THGEM-TPC

最终位置分辨目标：100um



样机实验室加压测试

TPC漂移场、120mm, Strip均匀分压

72*7 PADs

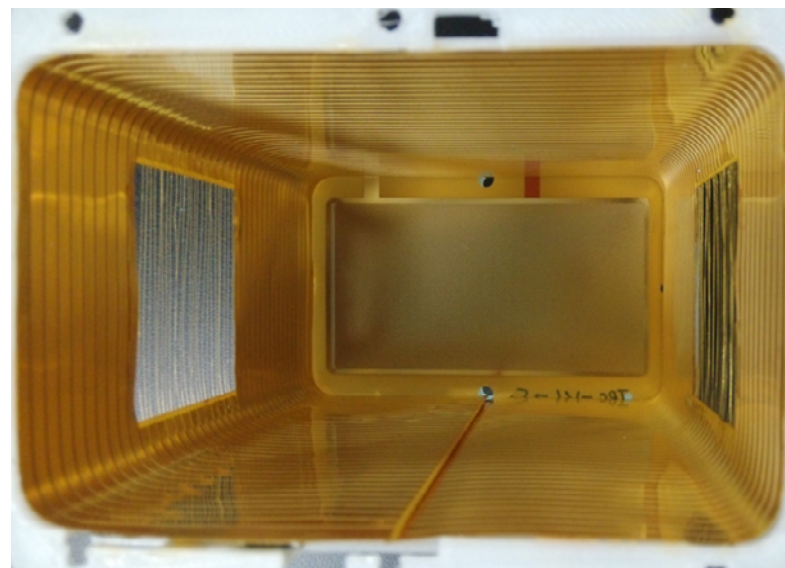
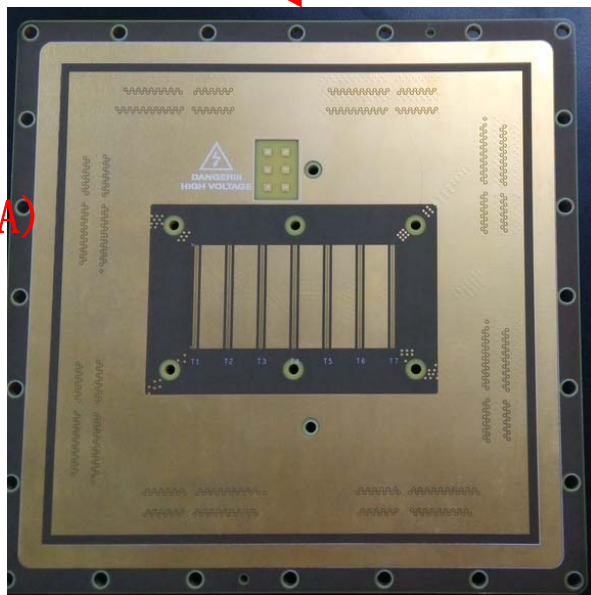
511路

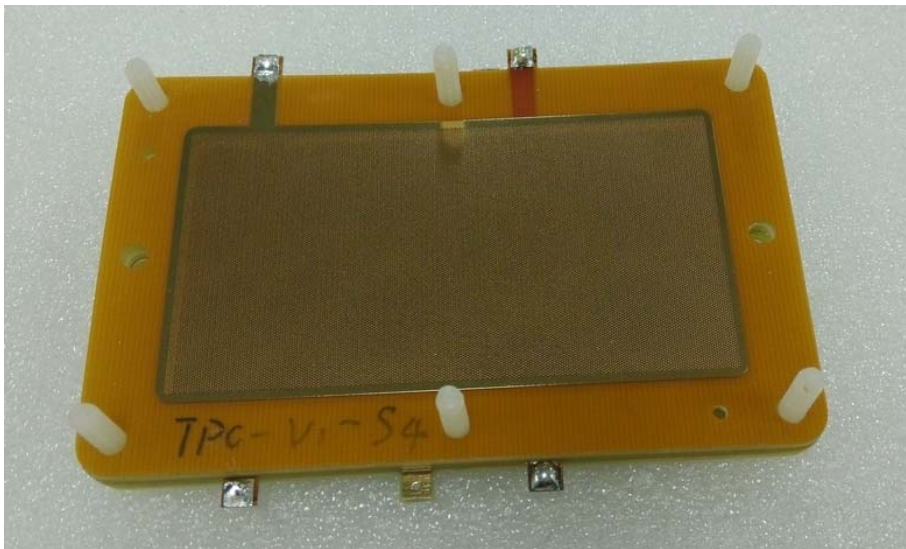
清华ASIC (CASA)

前端电子学

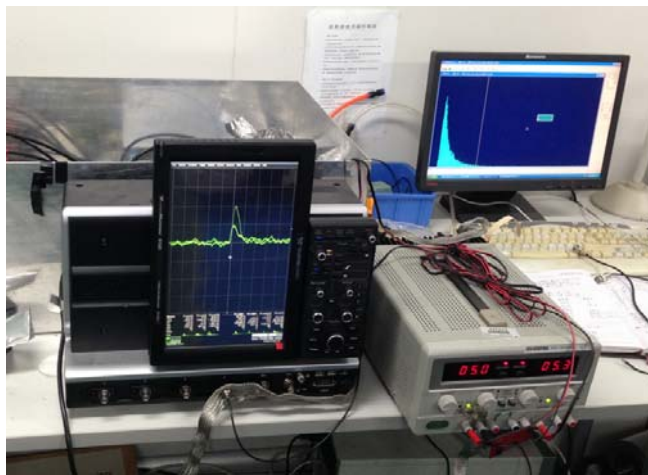
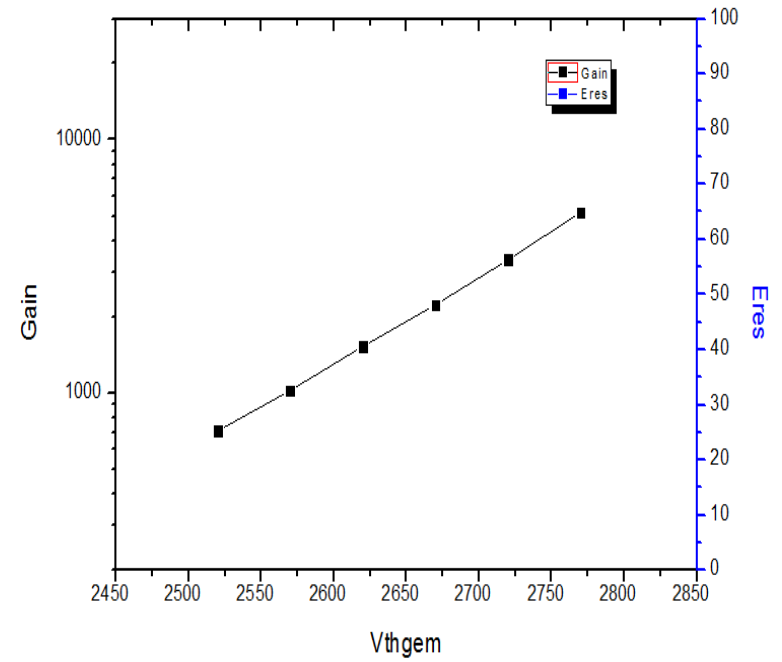
每道均有时间和电荷信息

后端ADC读出

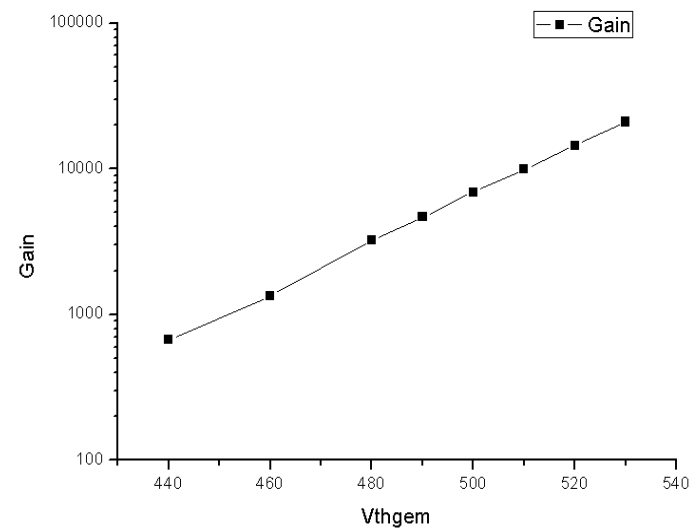




TPC厚GEM：单层 5×10^3 ，双层 2×10^4 ，达到预期指标

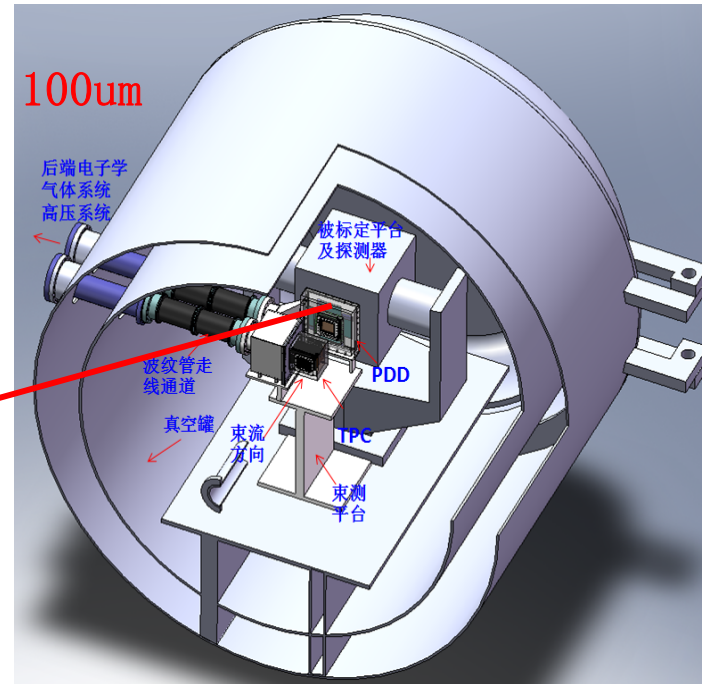
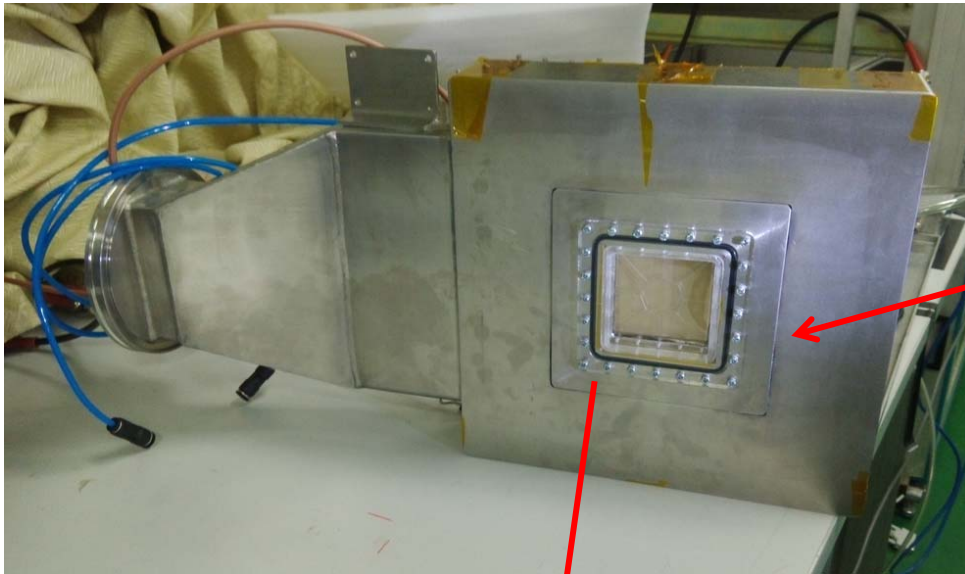


对高能所研发的ASIC芯片也进行了测试，得到动态范围 $5.28 \sim 200\text{fc}$ ，满足要求，详见吴文欢报告。



➤ 粒子分布探测器：PDD

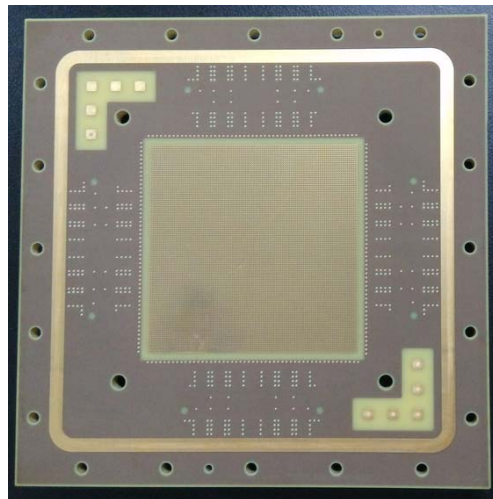
最终位置分辨目标：100um



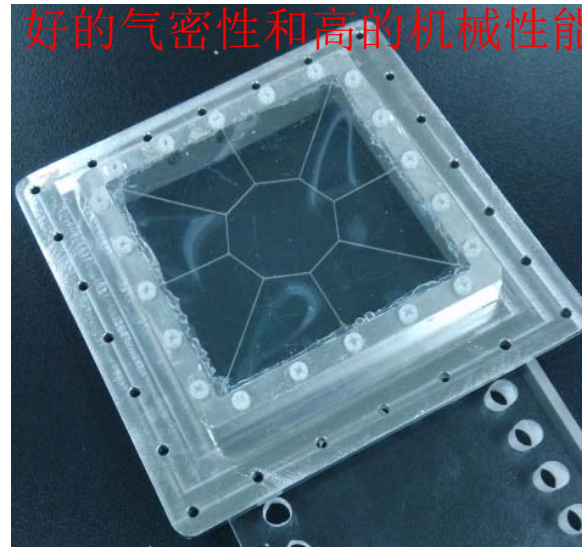
样机完成第一次束流实验

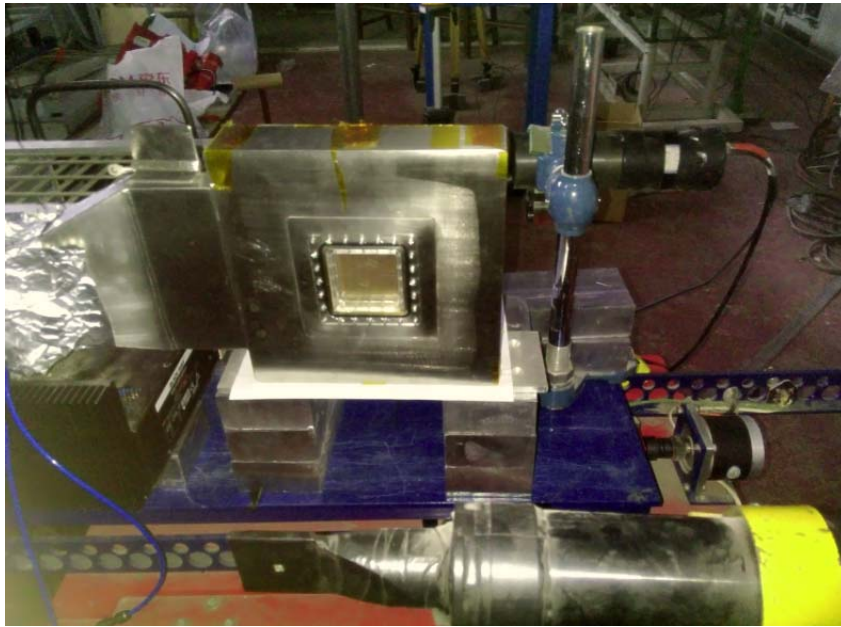
感应读出板
Strip: 100+100
清华ASIC (CASA)
前端电子学
每道只需
电荷信息

后端ADC读出

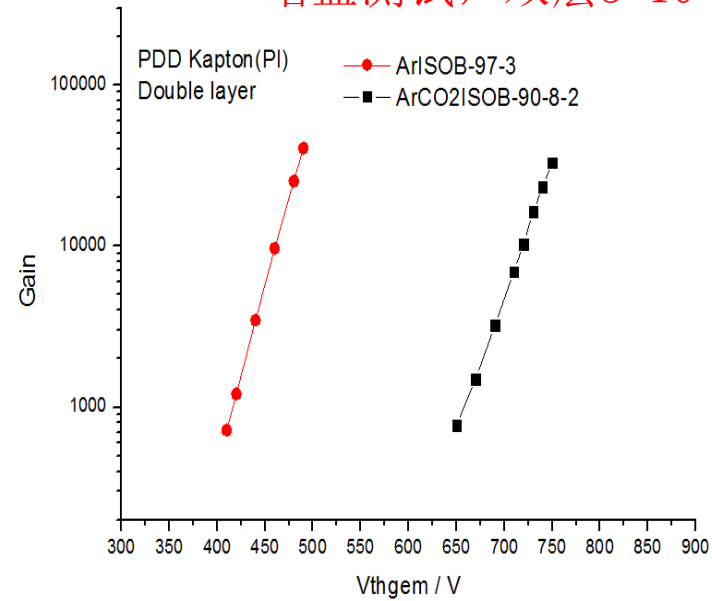


60*60mm²膜窗，厚度50um，
好的气密性和高的机械性能

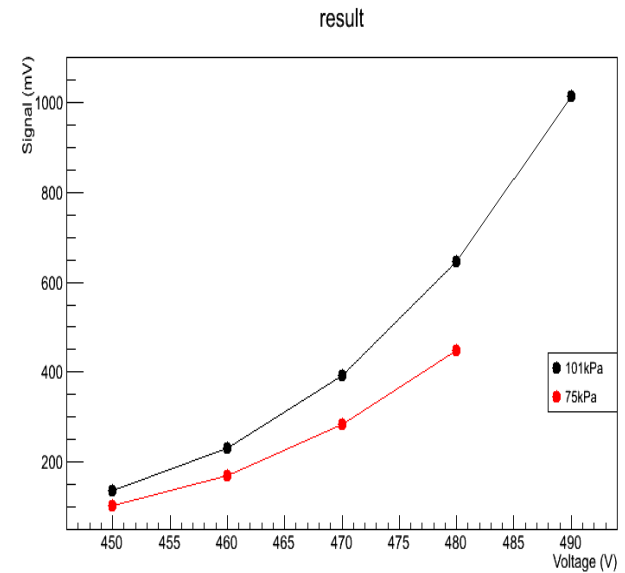
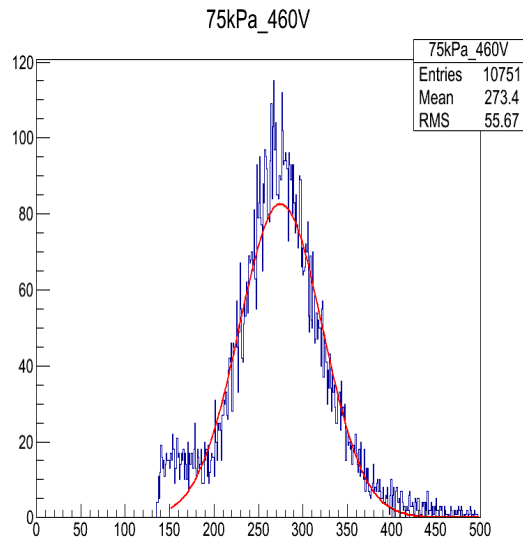
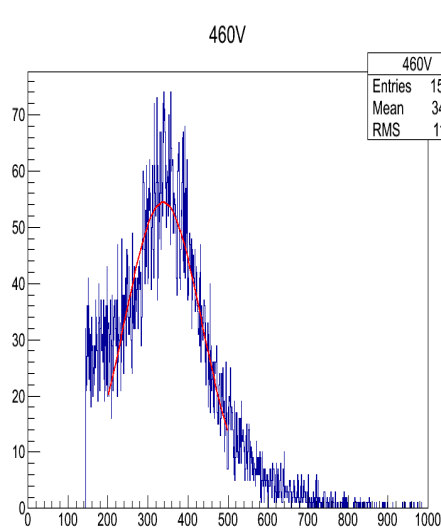




增益测试，双层 3×10^4

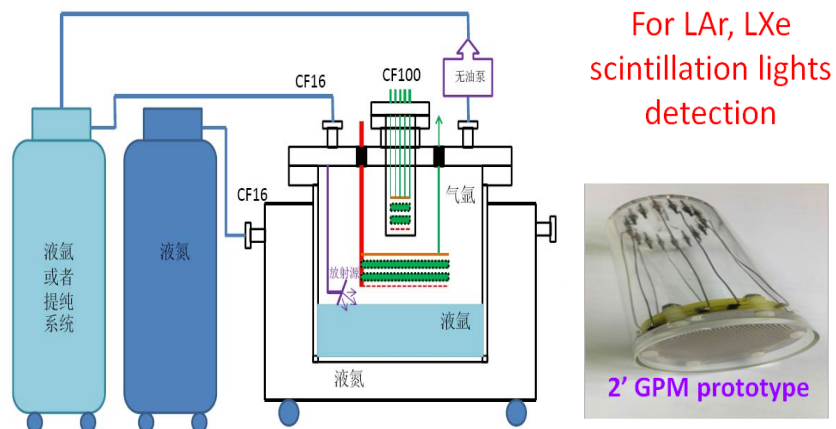


束流测试初步结果，最小电离Pi粒子响应良好；0.75ATM负压下增益有所减小，工作高压越高，减小百分比越大，>20%

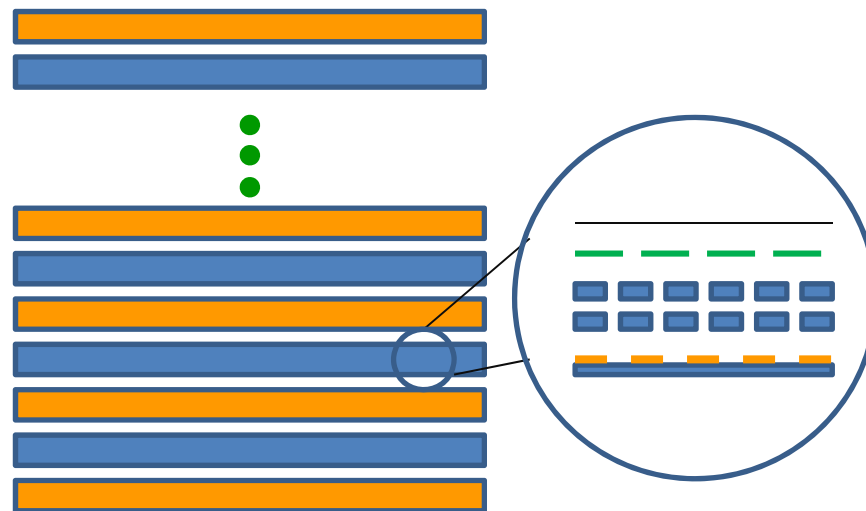


三、气体光电倍增(液氩液氙闪烁光探测)

低本底、高增益THGEM

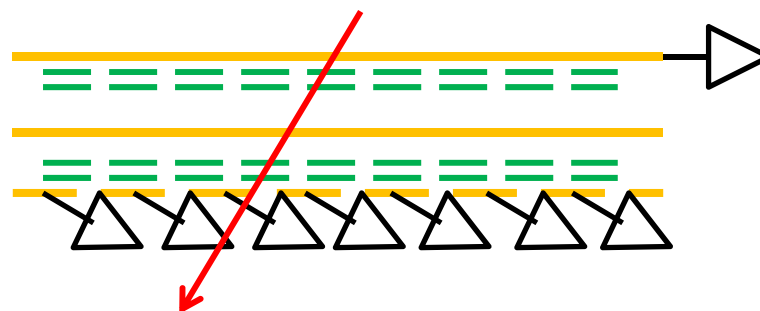


四、CEPC 数字强子量能器 (DHCAL)



五、Mu子探测器

- 厚GEM作灵敏探测器为方案之一
- 关键技术之一即为大面积厚GEM的批量制作
- 双层二维读出。
- CMS和ATLAS的u子探测器升级均采用MPGD。



总 结

1. 基于机械钻孔，已实现FR-4、陶瓷、PTFE和Kapton四种不同基材厚GEM的小批量制作。
2. 通过机械钻孔技术实现了 $1.0 \times 0.5 \text{m}^2$ 厚GEM膜的制作。
3. 通过激光打孔实现了 $0.5 \times 0.5 \text{m}^2$ 厚GEM膜的制作。
4. 利用激光打孔，厚GEM最好本征分辨可达到 $86 \sim 43 \mu\text{m}$ 。
5. 新基材厚GEM性能优良，增益高，稳定性好，价格便宜，正应用于DCTB束测探测器、散裂中子探测器等工程项目，以及GPM、DHCAH, MuSystem等实验项目。

**感谢重点实验室基金的支持！
欢迎交流合作！**