

STCF气体内径迹探测器 研究进展

报告人：李嘉铭

代表STCF-ITKW团队

STCF2025, 2025/07/03

摘要



综述

探测器

读出电子学

前端读出芯片

总结

摘要



综述

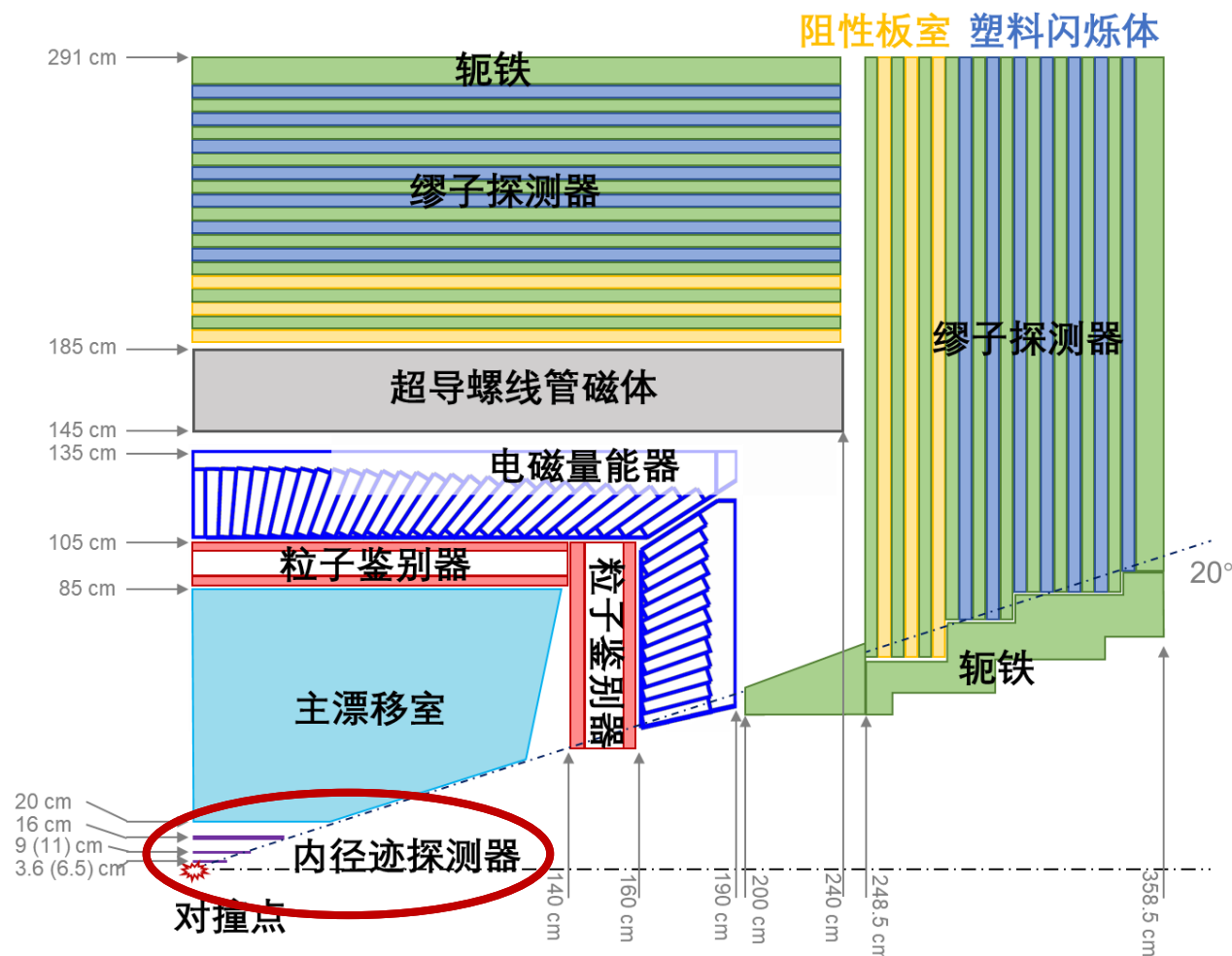
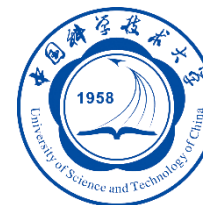
探测器

读出电子学

前端读出芯片

总结

谱仪系统组成



灵敏区角度: $94\% \cdot 4\pi$ ($\theta \sim 20^\circ$)

Physics Process	Optimized Sub-detector	Requirements
$\tau \rightarrow K_s \pi \nu_\tau$, $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$, $D_{(s)} \text{ tag}$	Tracker	acceptance: 93% of 4π ; trk. eff.: $> 99\%$ at $p_T > 0.3 \text{ GeV}/c$; $> 90\%$ at $p_T = 0.1 \text{ GeV}/c$ $\sigma_p/p = 0.5\%$, $\sigma_{\gamma\phi} = 130 \mu\text{m}$ at $1 \text{ GeV}/c$
$e^+e^- \rightarrow KK + X$, $D_{(s)} \text{ decays}$	PID	K/π separation ($p < 2 \text{ GeV}/c$): 3σ , efficiency $> 99\%$
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$, $D_s \rightarrow \mu\nu$	MUC, PID	π/μ suppression power over 30 at $p < 2 \text{ GeV}$, μ efficiency over 95% at $p = 1 \text{ GeV}$
$\tau \rightarrow \gamma\mu$, $\psi(3686) \rightarrow \gamma\eta(2S)$	EMC	$\sigma_E/E \approx 2.5\%$ at 1 GeV $\sigma_{\text{pos}} = 4 \text{ mm}$ at 1 GeV
$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, $D_0 \rightarrow K_L \pi^+ \pi^-$	EMC, MUC	$\sigma_T = \frac{300}{\sqrt{p^3(\text{GeV}^3)}} \text{ ps}$

❖ 内径迹探测器 (ITK, 两种技术路线)

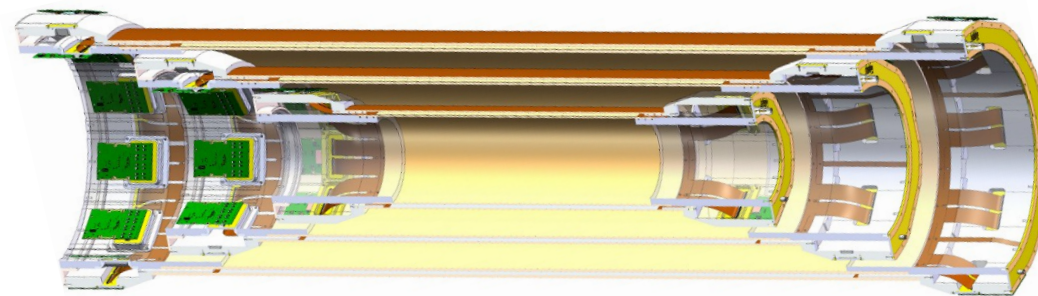
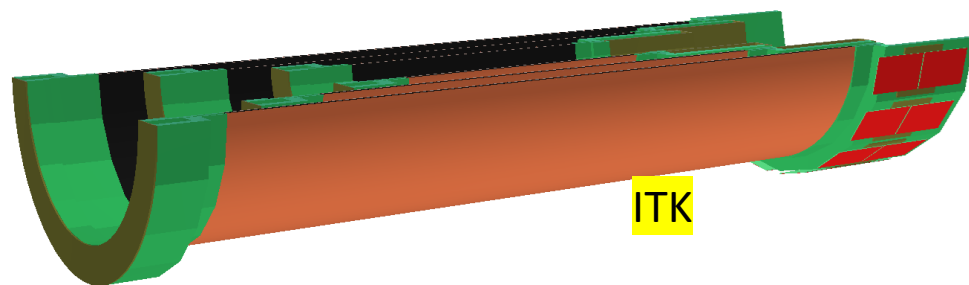
- MPGD: cylindrical MPGD
- Silicon: CMOS MAPS

气体型内径迹探测器



为了在高亮度实验中实现径迹测量，内径迹探测器需要满足如下要求：

- 在1T磁场下实现良好的位置分辨 ($< 100 \mu\text{m}$)
- 极低的质量 ($< 0.3\% X_0$)
- 具备高计数率能力
-



可能的选项之一：

圆柱型MPGDs

- 易于弯曲为圆柱形
- 低质量
- 较低成本

低质量圆柱形MPGD



BESIII c-GEM

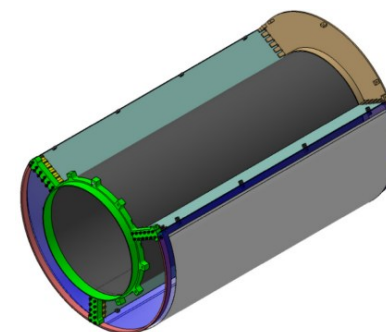
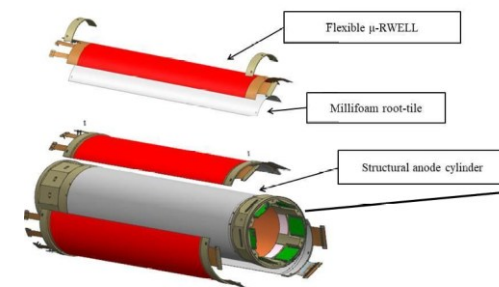
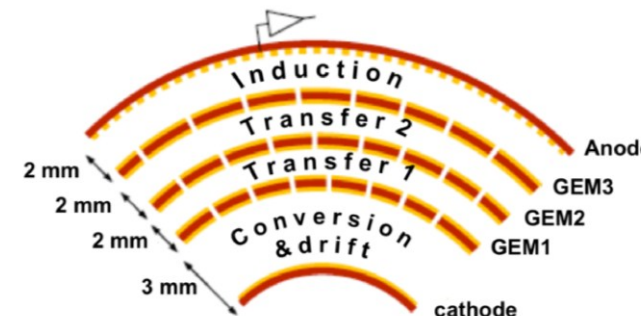
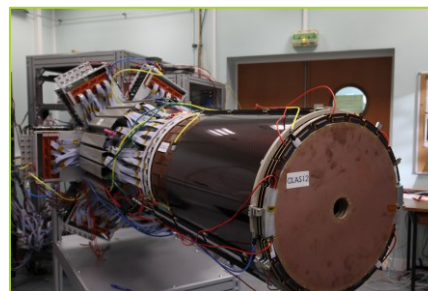
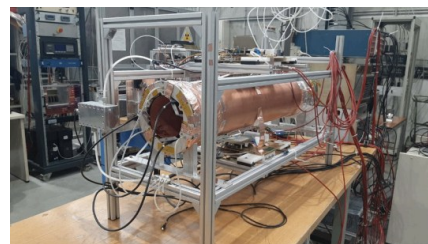
- 最大尺寸: $D=323.8\text{mm}$, $L=847\text{mm}$
- 质量: $\sim 0.5\%X_0$
- 基于电荷重心法的位置分辨($<5^\circ$): $\sim 200\ \mu\text{m}$
- 对于MIP的探测效率: $\sim 95\%$

INFN-LNF c- μ RWELL prototype

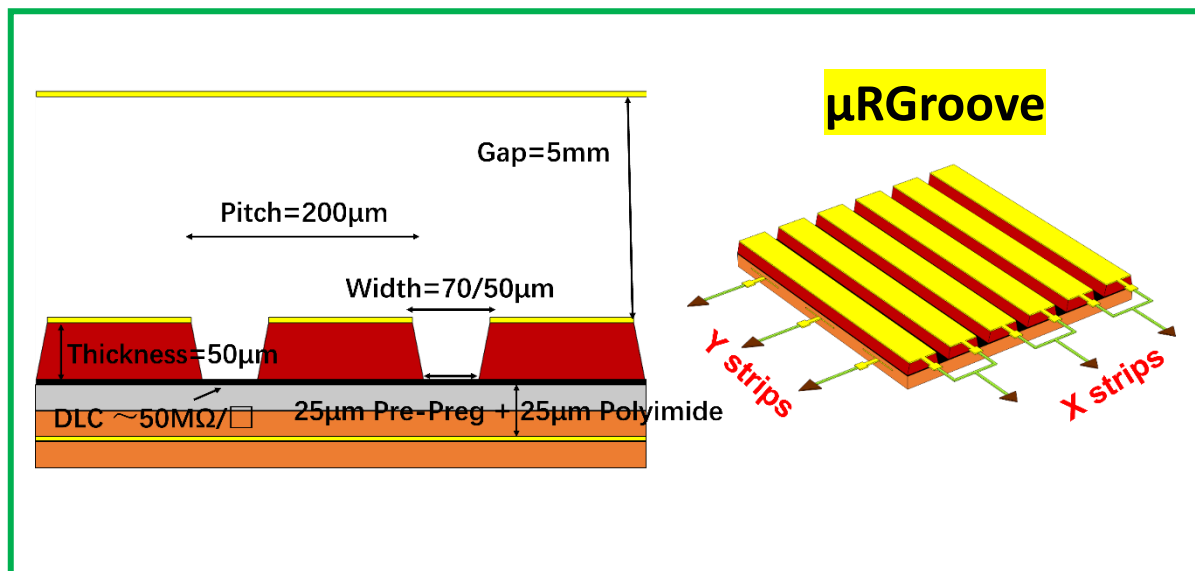
- 尺寸: $D=168.5\text{mm}$, $L=600\text{mm}$
- 质量: $\sim 0.6\%X_0$
- 基于电荷重心法的位置分辨($<3^\circ$): $\sim 460\ \mu\text{m}$
- 对于MIP的探测效率: $> 95\%$

CLAS12 c-Micromegas

- 尺寸: $D=207.5\text{mm}$, $L=712\text{mm}$
- 质量: 未有公开资料
- 位置分辨: $\sim 432\ \mu\text{m}$ (5T)
- 探测效率: $\sim 90\%$



微槽型MPGD (μ RGroove)



□ μ RGroove的阴极本身可用于其中一个维度的信号读出

- ✓ X与Y读出条解耦，避免感应电荷共享效应，从而有效提升信号幅度

□ 圆柱形 μ RGroove：

- ✓ 结构简洁：仅包含漂移区与 μ RGroove电极
- ✓ 每个电极都包含支撑结构
- ✓ 更低的质量：仅需额外增加1个维度的读出条
- ✓ 易于清洗，以便长期维护

摘要



综述

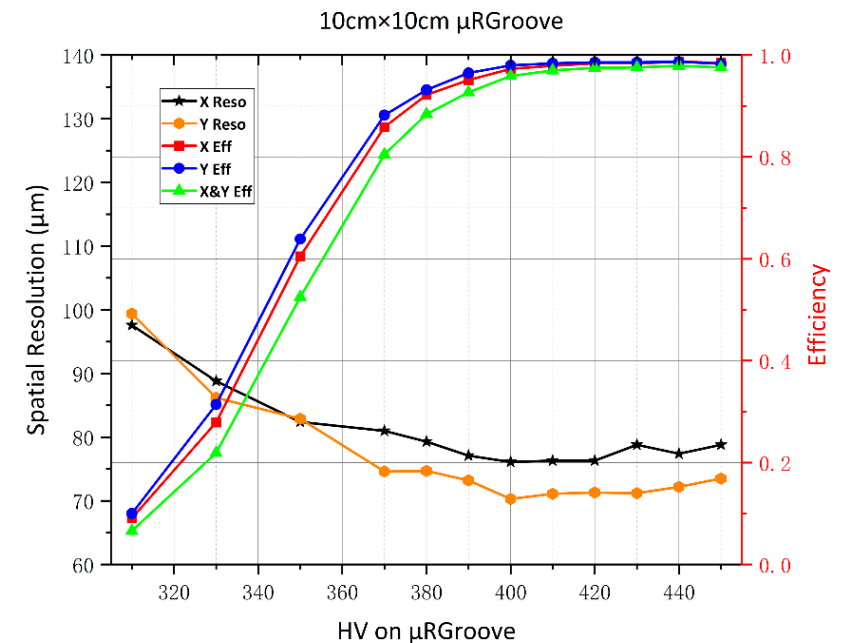
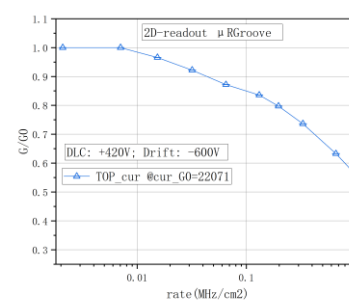
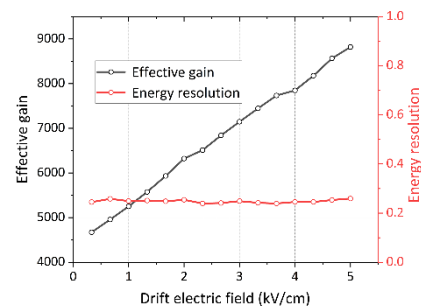
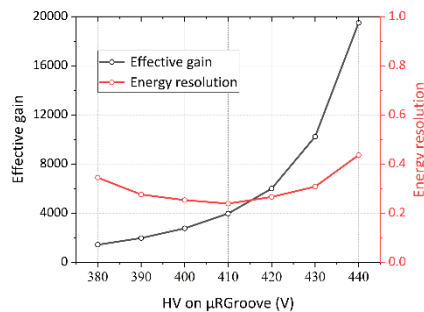
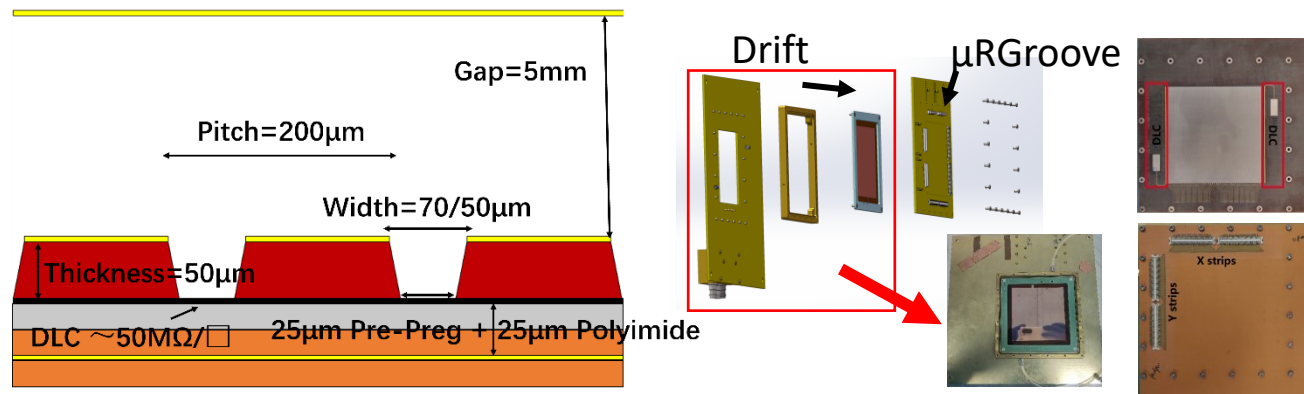
探测器

读出电子学

前端读出芯片

总结

工作基础——平面型 μ RGroove



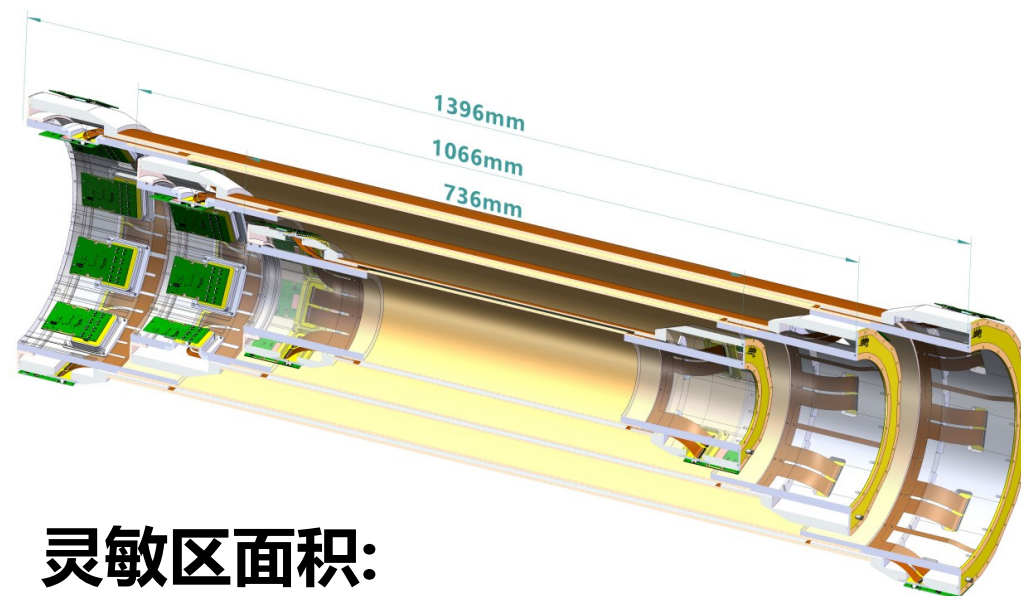
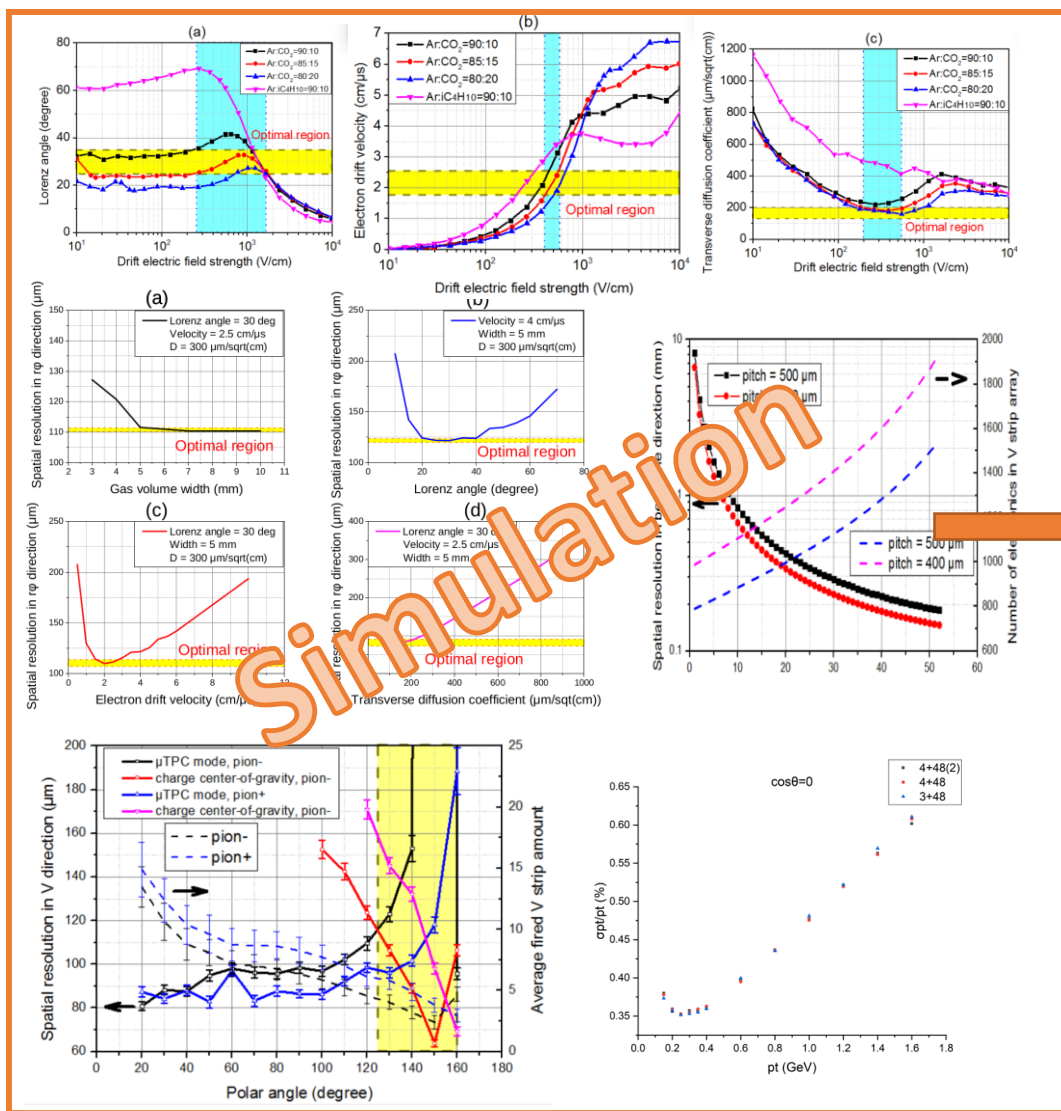
□ 10cm×10cm 原型

- ✓ 信号有效增益 > 10^4 、能量分辨 ~ 25%
- ✓ 探测效率 ~ 97.9%、位置分辨 < 80 μ m

- ✓ 与 μ RWELL的制作工艺兼容
- ✓ 易于生产、成本低

μ RGroove是STCF内径迹探测器的解决方案之一

STCF-ITKW概念设计

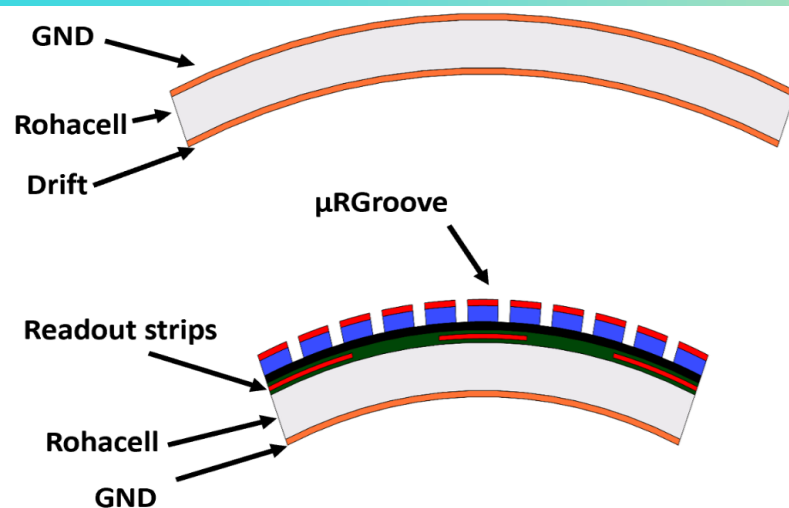
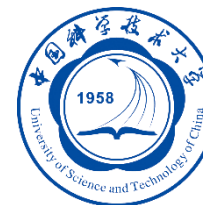


灵敏区面积:

- **最内层:** 直径131.0 mm、长度380.0 mm
- **中间层:** 直径229.4 mm、长度650.0mm
- **最外层:** 直径327.9 mm、长度920.0mm

- **读出方式:** UV二维读出、400 μm 条中心距
- **气隙:** 基于本底与 μTPC 重建精度设置为5 mm
- **工作气体参数:** 扩散、漂移速度与洛伦兹角等

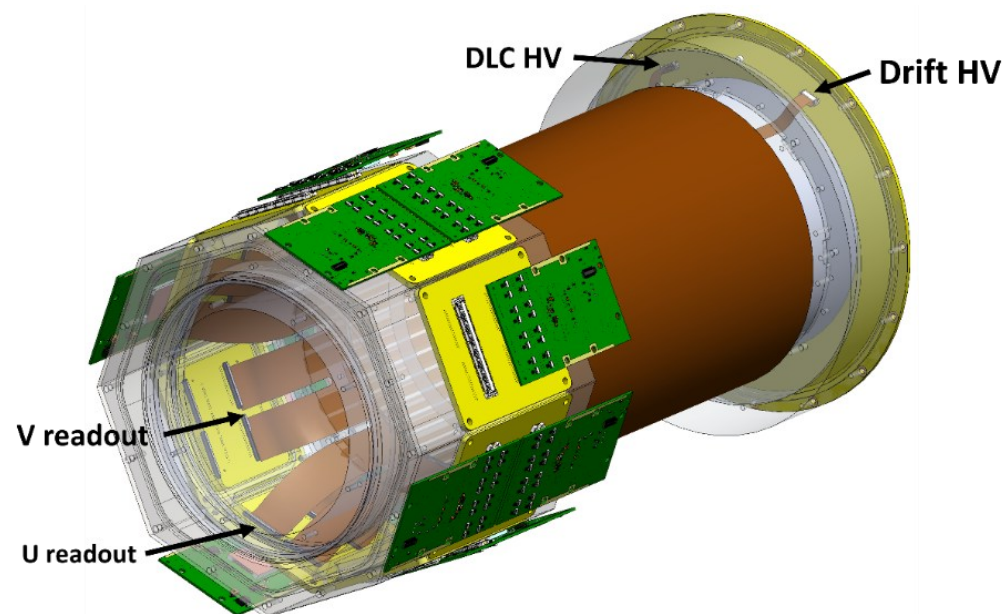
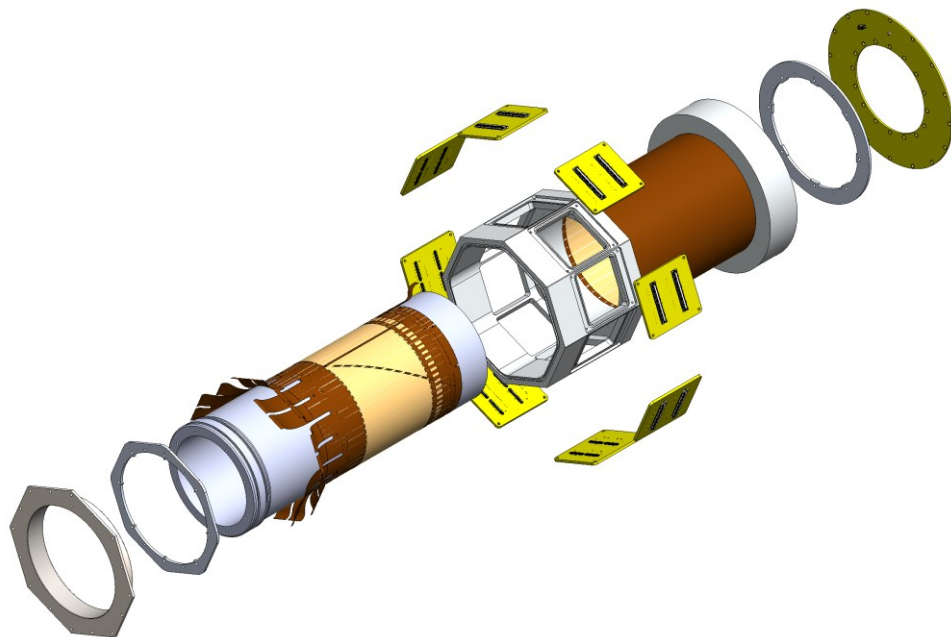
原型C- μ RGroove的层叠结构



□ 首个C- μ RGroove原型样机:

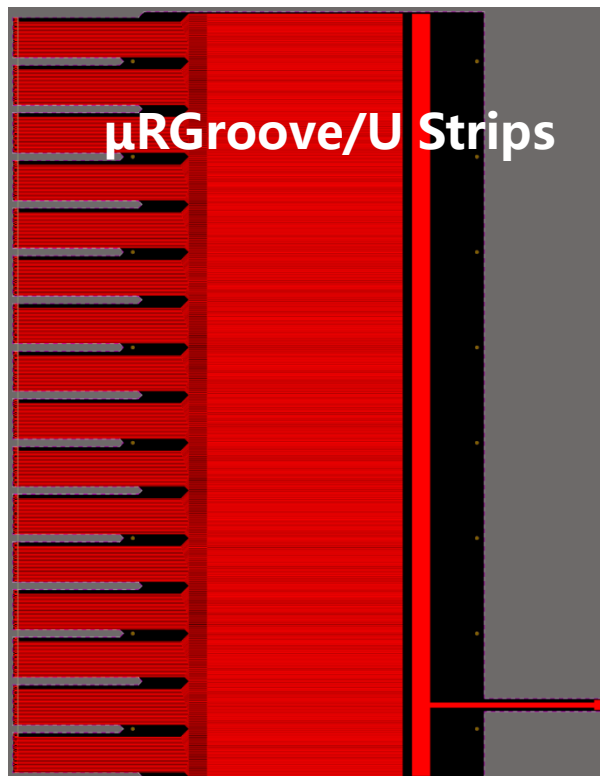
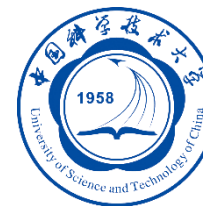
- 灵敏区尺寸: 直径131.0 mm、长度100.0 mm
- 外筒为漂移极、内筒为 μ RGroove PCB
- 可拆卸式机械设计
- 倍增结构开口向外
- 内外筒均包含支撑结构
- 低物质质量电极、Rohacell泡沫和薄胶工艺, **总物质质量: $\sim 0.23\% X_0$**

Structure	Material	Thickness (cm)	Material budget (X_0)
Drift electrode	LMB-GND	---	2*0.001138%
	Polyimide ($X_0=28.57\text{cm}$)	0.0025*2	0.0175%
	Glue ($X\approx 20\text{cm}$)	0.001*2	0.01%
	Rohacell ($X_0\approx 689\text{cm}$)	0.2	0.029%
Gas volume	Argon-based gas mixture ($X_0=11760\text{cm}$)	0.5	0.00425%
Inner cylinder (μ RGroove foil)	Cu ($X_0=1.43\text{cm}$)	0.0015*65%	0.0682%
	Cr ($X_0=2.077\text{cm}$)	0.000001*65%	0.0000313%
	Apical ($X_0=28.57\text{cm}$)	0.005*70%	0.01225%
	Glue ($X_0\approx 20\text{cm}$)	0.001*5	0.025%
	Kapton ($X_0=28.57\text{cm}$)	0.0025*2	0.0175%
	Al ($X_0=8.892\text{cm}$)	0.0012*(1*33.6%)	0.00453%
	DLC ($X_0=12.13\text{cm}$)	0.0001	0.00082%
	Polyimide ($X_0=28.57\text{cm}$)	0.0025	0.00875%
	Rohacell ($X_0\approx 689\text{cm}$)	0.2	0.029%
	LMB-GND	---	0.001138%
Total			0.2302%

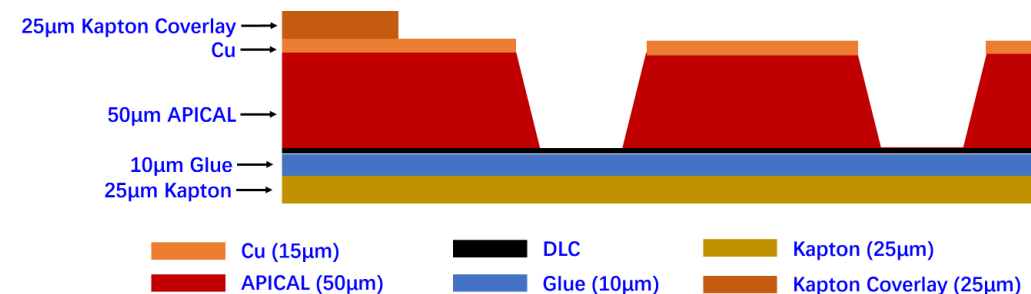


- 铝合金（金属）套筒可实现良好地连接和噪声屏蔽
- 机械式密封确保探测器可拆卸
- 隔片用于提供均匀的5 mm漂移间隙
- 三个主要组成部分：读出电子学端（FEE）、灵敏区、高压端（HV）
- 电极基于柔性基板设计，可以弯曲以连接至连接器

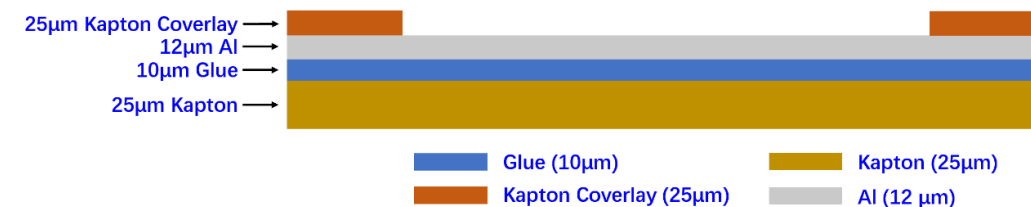
μ RGroove读出条设计



μ RGroove层叠结构

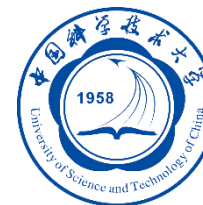


V条读出层叠结构



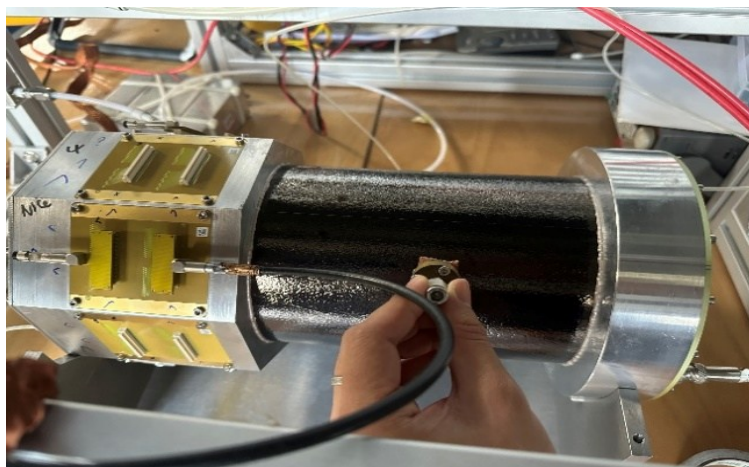
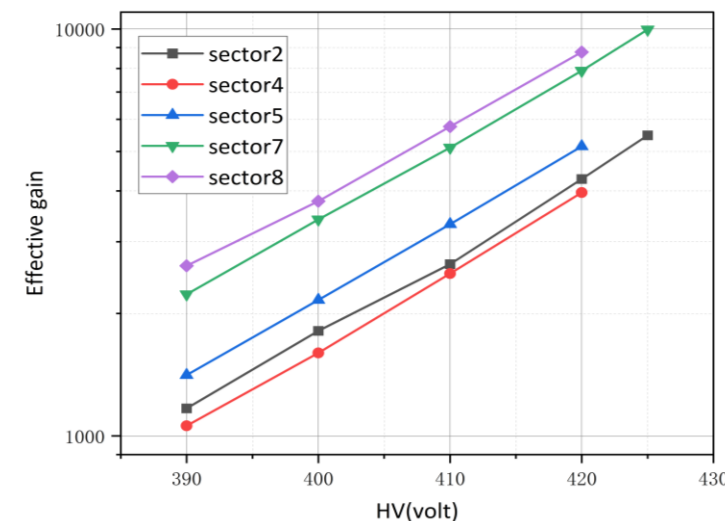
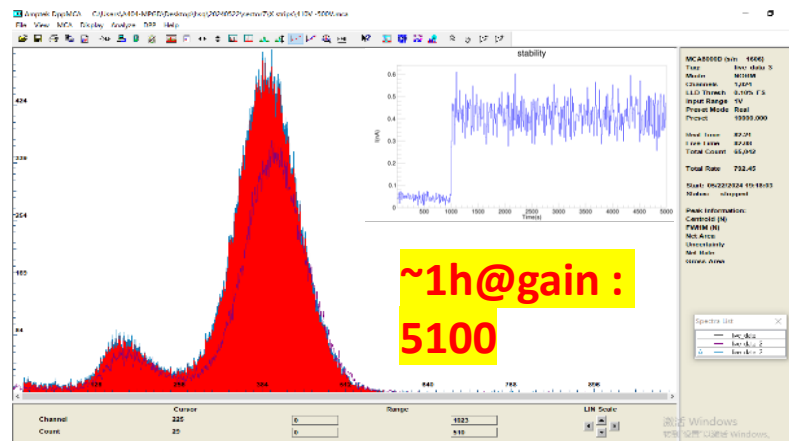
- U/V二维读出，条中心距：U条为0.4 mm，V条为0.8 mm，UV条夹角为15°。
- 2个PCB分别负责其中一维读出
- 25 μm厚的Kapton材质基板
- 铝制V型读出条

增益与能量分辨率测试



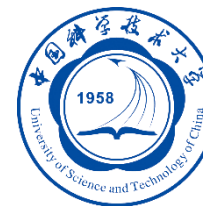
测试条件:

- 气体: $\text{Ar}:\text{iC}_4\text{H}_{10}/95:5$
- 放射源: ^{55}Fe
- 从U条 (阴极) 读出
- V条接地
- 使用Ortec142AH/671 + MCA分析
- 通过信号幅度谱实现增益测量

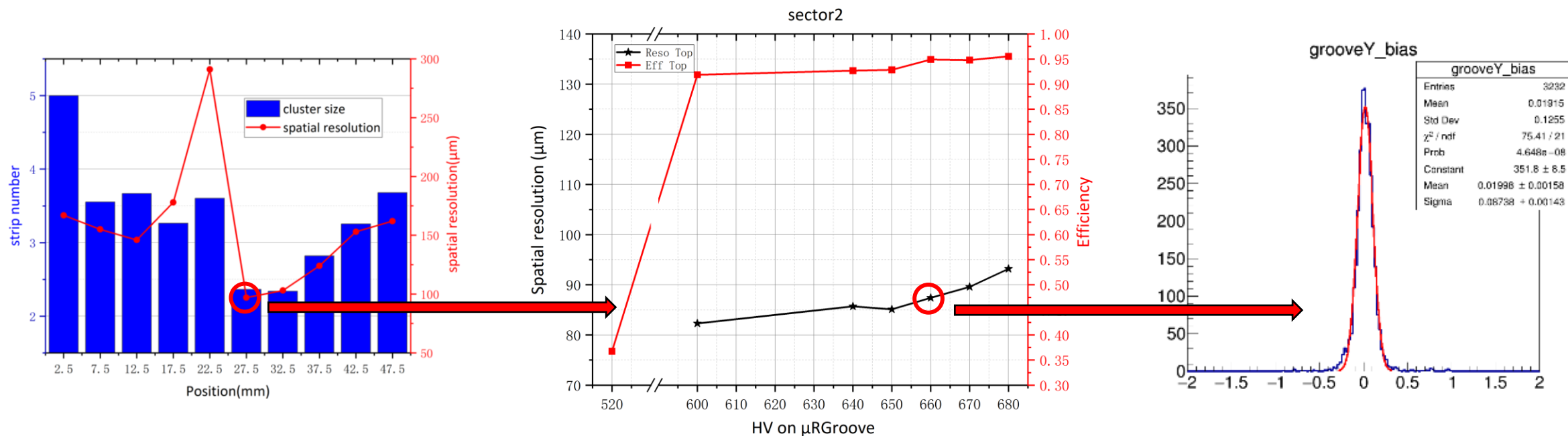


- ✓ 能量分辨率: ~26%
- ✓ 有效增益: 4000 ~ 10000
- ✓ U条与V条信号大小相似
- ✓ 在低湿度下稳定性良好
- × 由于气体 (流动) 导致增益均匀性较差

探测效率与位置分辨



- 使用电荷重心法 (CC) 对垂直入射粒子进行分析



- ✓ 寻找垂直入射区域
- ✓ 使用电荷重心法进行分析

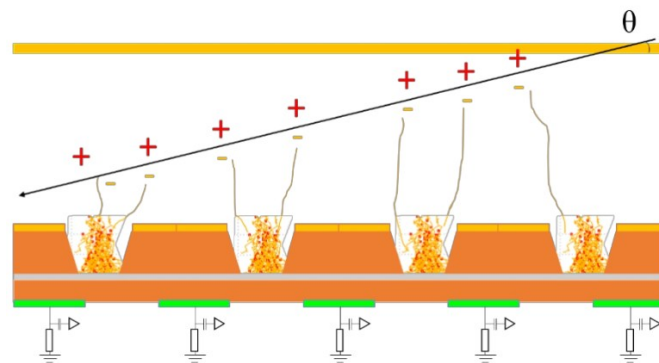
✗ 褶皱可能会导致位置分辨降低

- ✓ 垂直入射粒子的位置分辨: 83 ~ 93 μm
- ✓ 探测效率 > 95%

探测效率与位置分辨



• 使用Micro TPC方法分析斜入射粒子



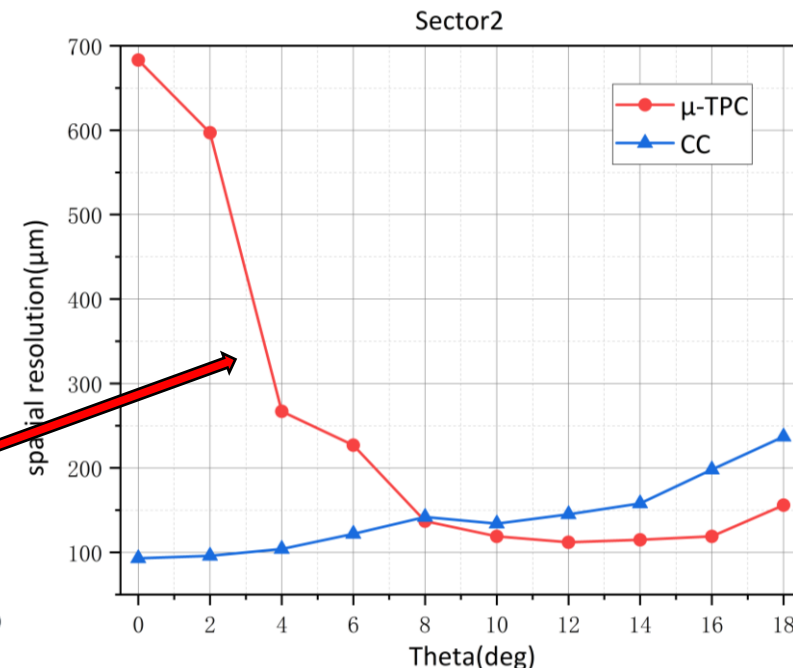
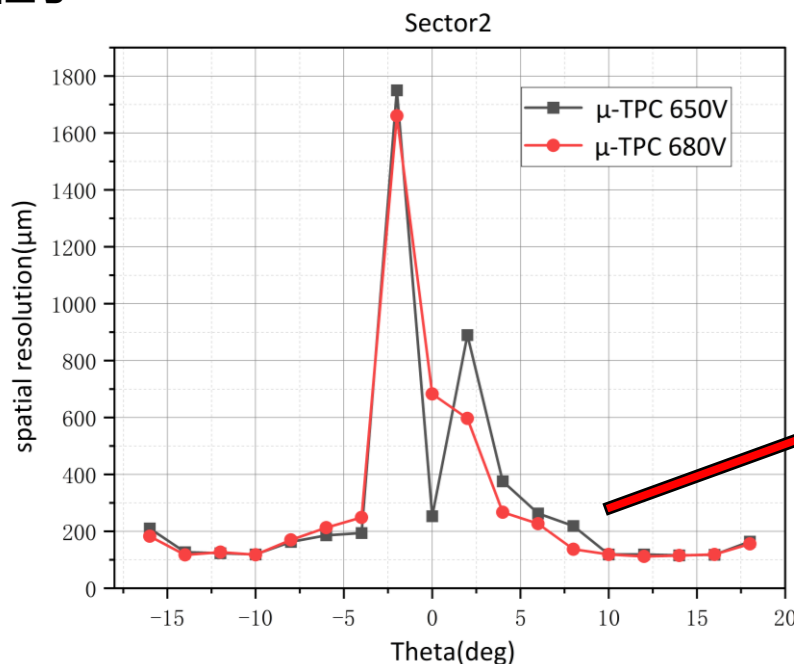
对齐与旋转修正

圆面位置校正

恒比定时

微径迹拟合

μ TPC



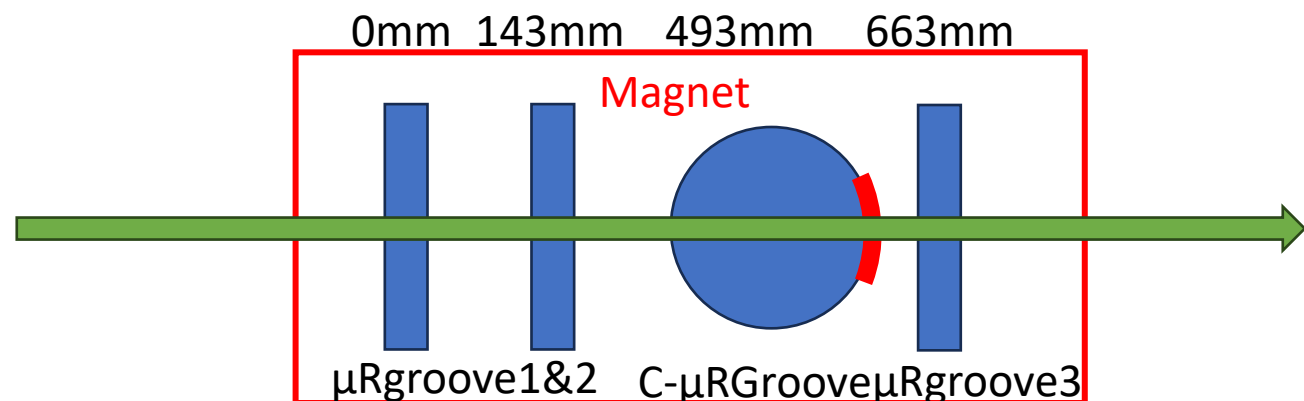
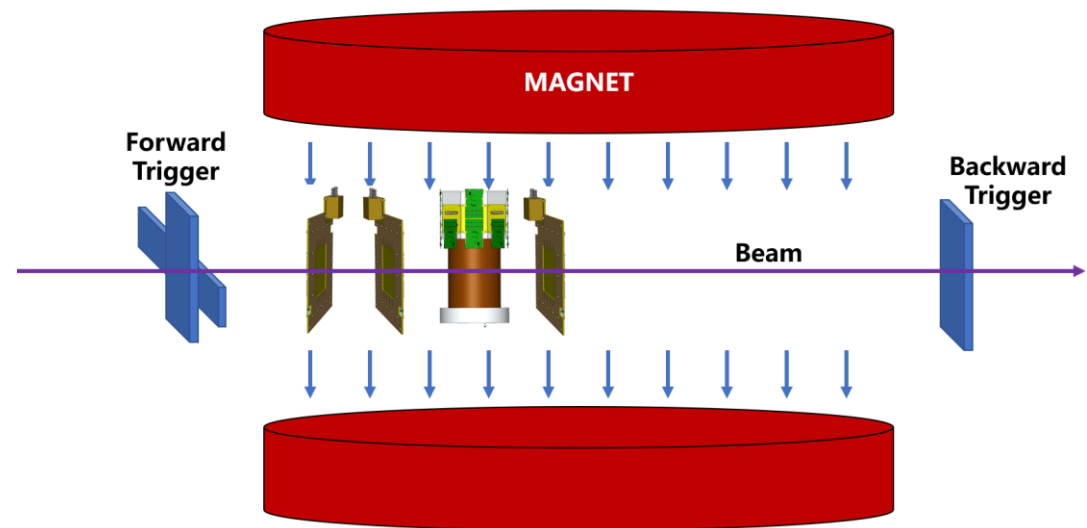
- ✓ 优化对齐算法，完成基于 μ TPC的分析方法
- ✓ 当入射角**大于 8°** 时，使用 μ TPC可获得更好的位置分辨 (**$<120 \mu\text{m}$** ，含径迹误差)
- ✓ 完善径迹误差评估方法，待测维度径迹误差约为 **$43 \mu\text{m}$**

磁场中的束流测试

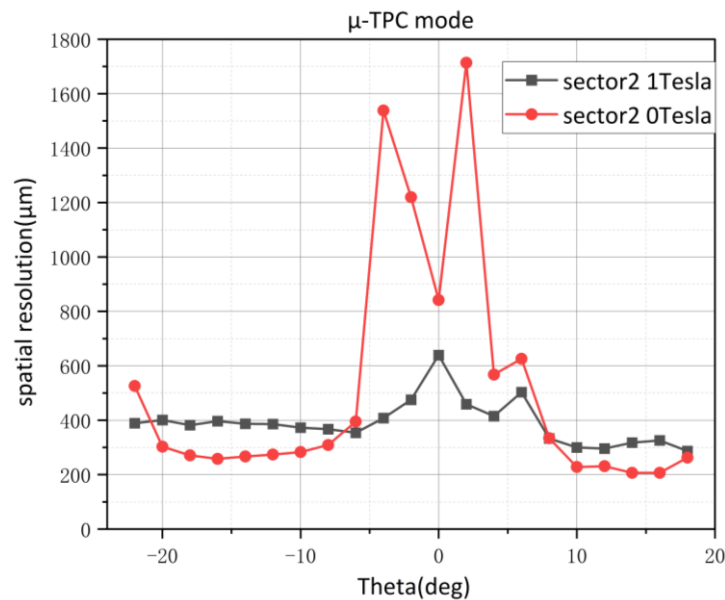


测试条件:

- 工作气体: $\text{Ar:CF}_4\text{:CO}_2/45:40:15$
- 从U条 (阴极) 读出、V条接地
- 使用APV25+SRS+mmDAQ分析
- 前后触发探测器之间的距离约为8米
- 3个平面型 $\mu\text{RGroove}$ 用于重建径迹
- 0.5 ~ 1.0 Tesla 磁场



磁场中的束流测试



磁场中的位置分辨

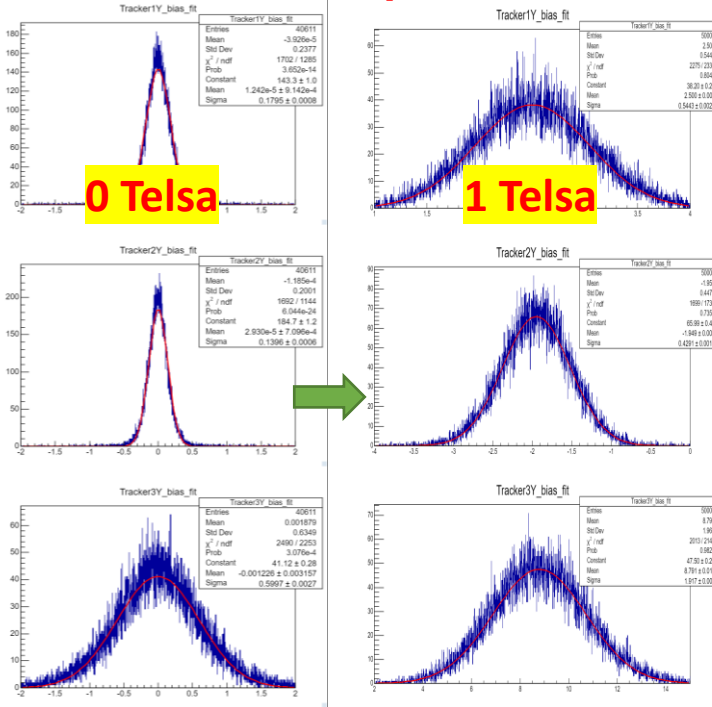
0 Tesla: 最佳位置分辨率 ~ 200微米。
较前次实验偏高，主要由于气体变化引起的漂移速度加快

1 Tesla: 最佳位置分辨率 ~ 300 μm 及 ~ 1.2 mm 偏移

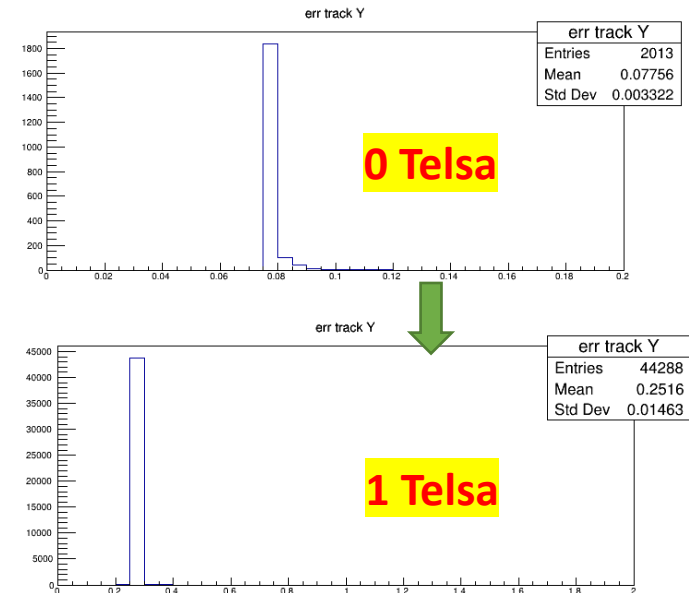
Tracker (平面型μRGroove) 受磁场影响很大。径迹误差从77μm (无磁) 剧烈劣化为251μm (1T)

Tracker定位有偏，使得重建径迹有偏

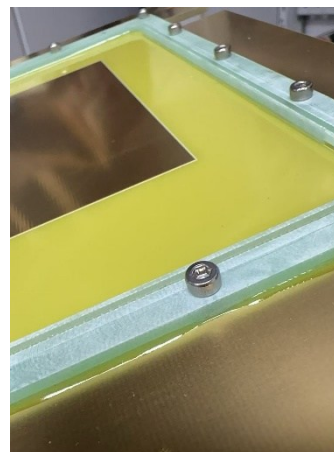
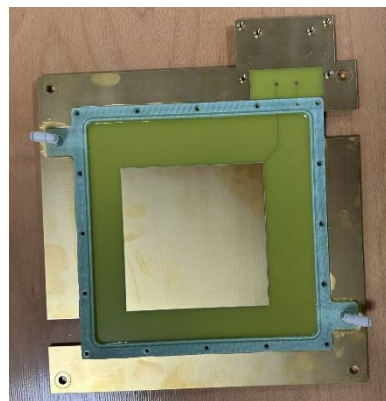
Tracker 性能



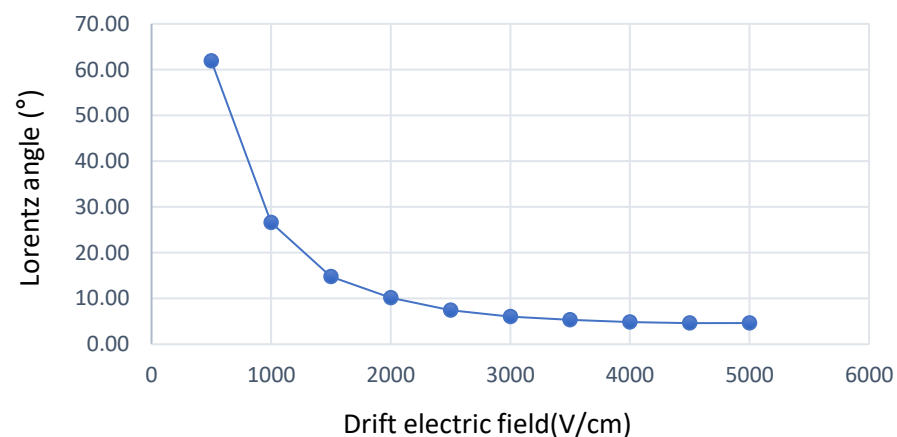
径迹误差



准备7月磁场下束流测试



Simulation results of Lorentz angle of Ar: iC_4H_{10} (98/2)



- 准备7月束流测试框架
- 优化tracker性能 (磁场下)
- 更薄的漂移气隙: 3mm
- 更高的漂移场: 3kV/cm
- 由此得到更小的洛伦兹角: $\sim 6^\circ$ (模拟值);
径迹误差预期 $< 80\mu m$ (模拟值)

摘要



综述

探测器

读出电子学

前端读出芯片

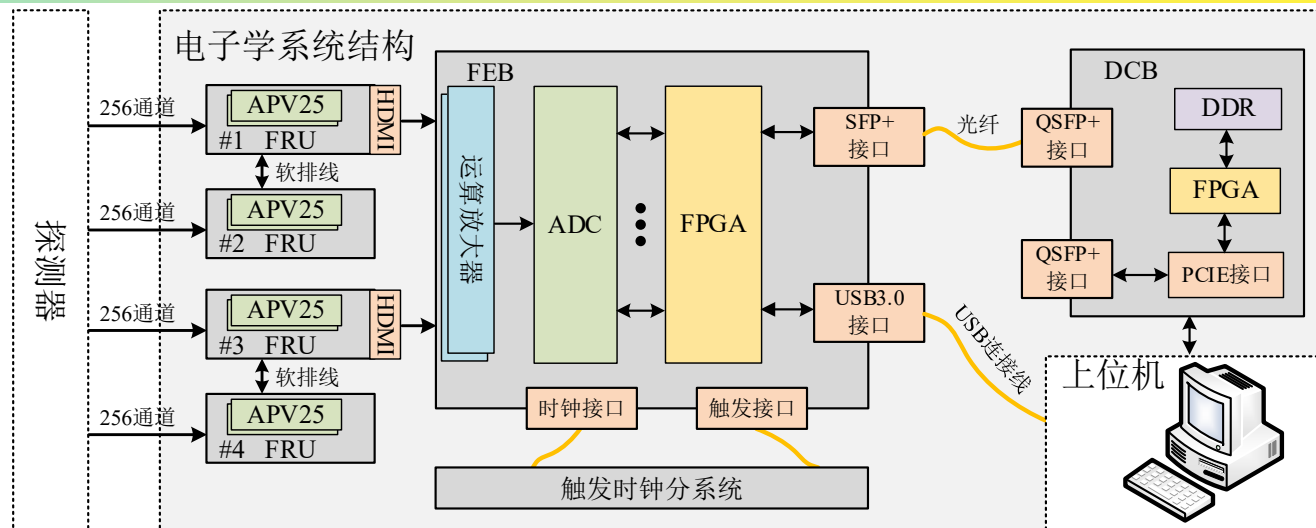
总结

完成基于APV25的1024路原理样机系统研制



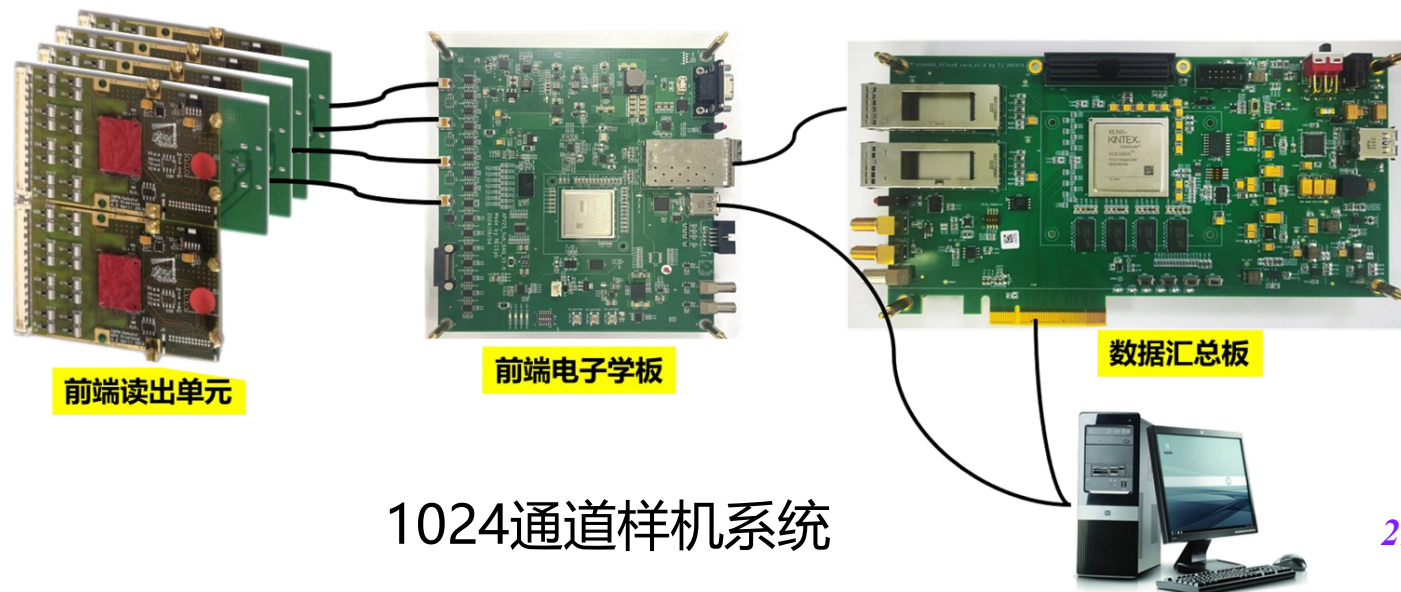
◆ 系统构成：

- 1块背板承载2块ASIC板
- 2块背板互联后通过HDMI与FEB板连接
- FEB板上承载ADC和FPGA芯片
- FEB板可通过SFP与数据汇总板连接
- 数据汇总板通过PCIE接口与服务器连接



◆ 主要工作：

- 固件方面完成了对APV输出数据的处理，组包后采用光纤读出
- 完成上位机软件设计并完成基线噪声、能量分辨、线性等测试

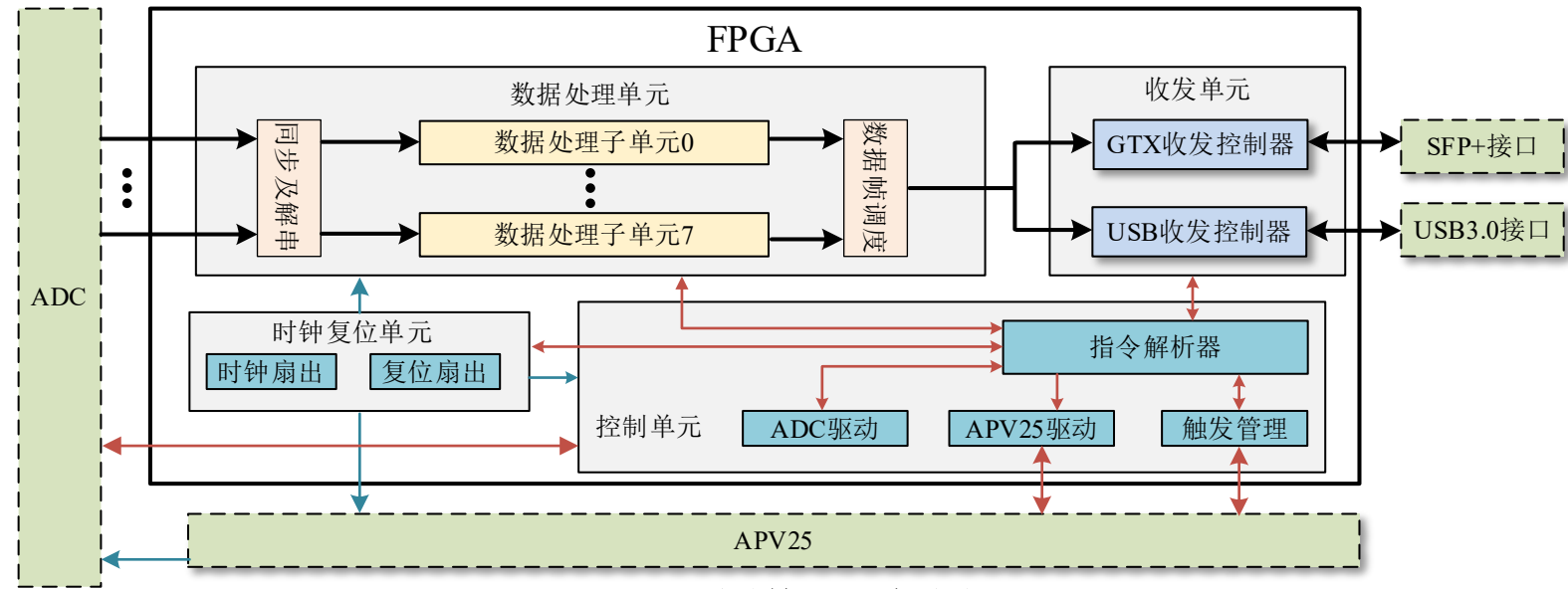


完成基于APV25的1024路原理样机系统研制



◆ FEB 固件设计

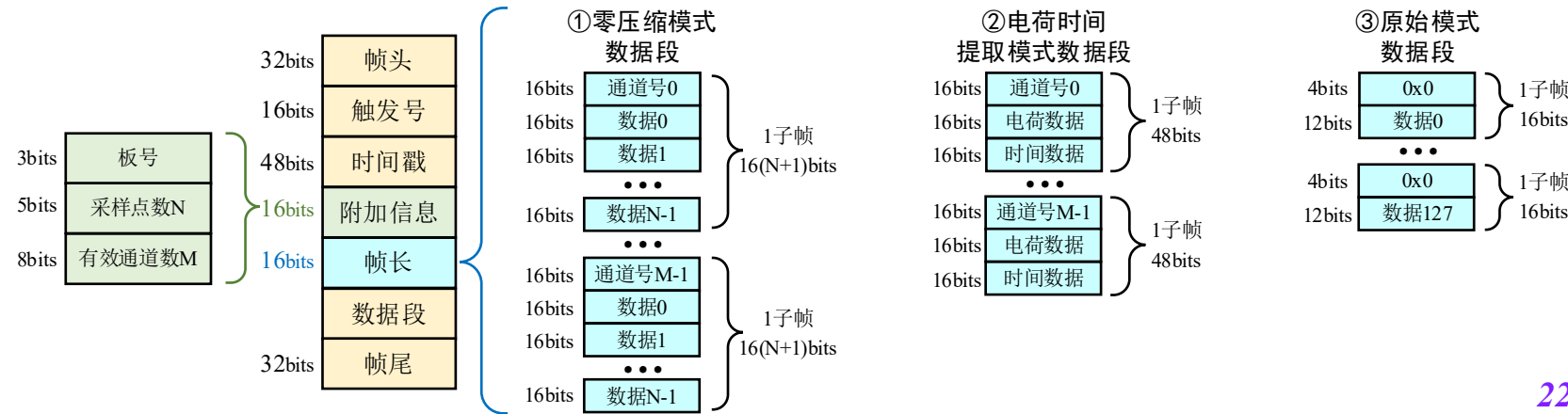
- 控制单元
- 数据处理单元
- 数据收发单元
- 时钟复位单元



FEB 固件设计框图

◆ FEB 协议帧设计

- 包含组帧状态机与异步组帧FIFO。
- 实现三种模式下的帧格式输出，区别在于数据段。



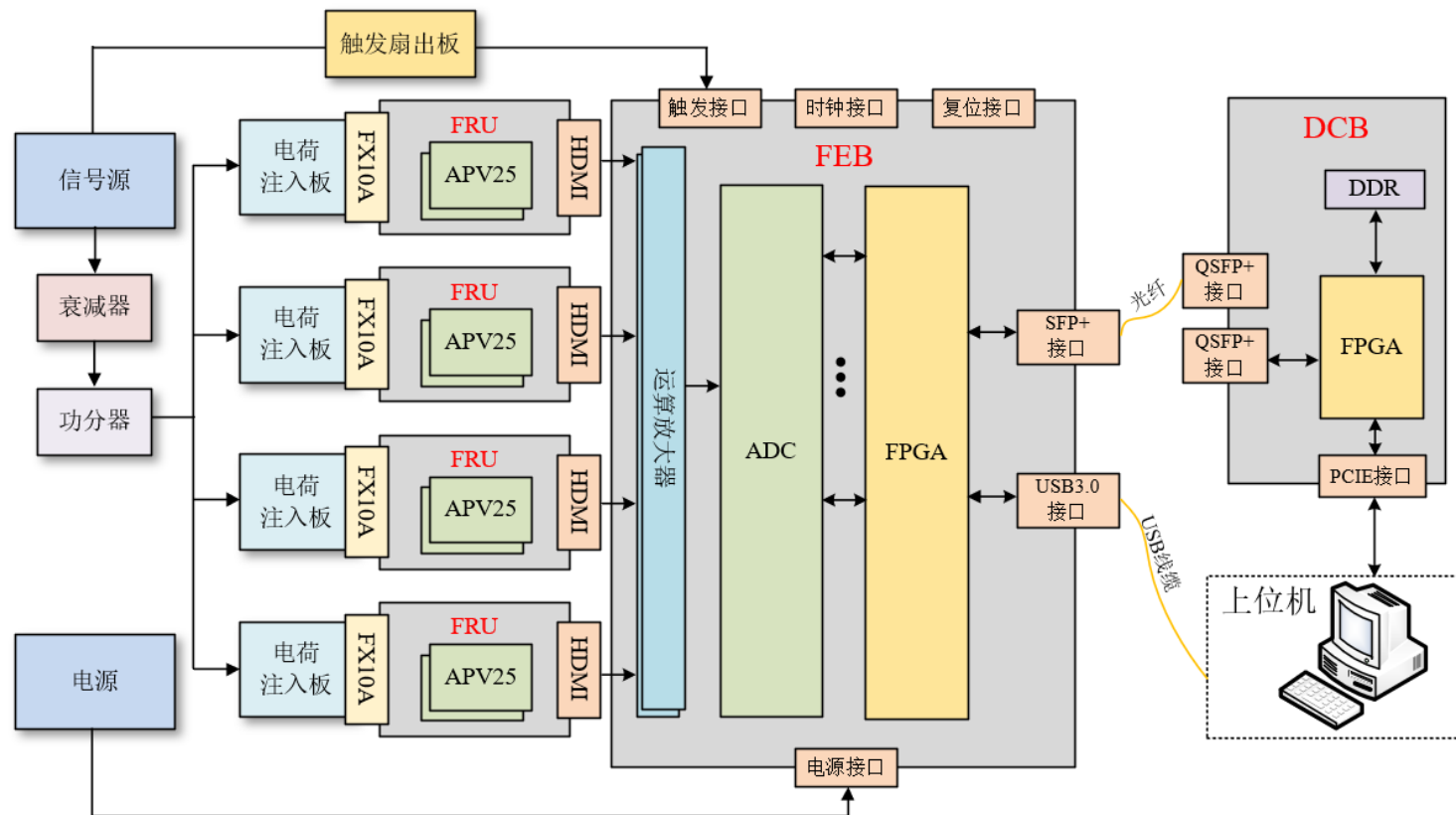
FEB 数据帧格式

◆ 测试方案

- 由数字信号源提供周期性指数衰减脉冲信号，经衰减器幅度调整，功分器扇出，输入自制的电荷注入板并扇出到APV25的模拟输入通道。

◆ 所需仪器

- 电源
- 信号源
- 衰减器
- 功分器
- 电荷注入板
- 触发扇出板
- FRU、FEB、DCB

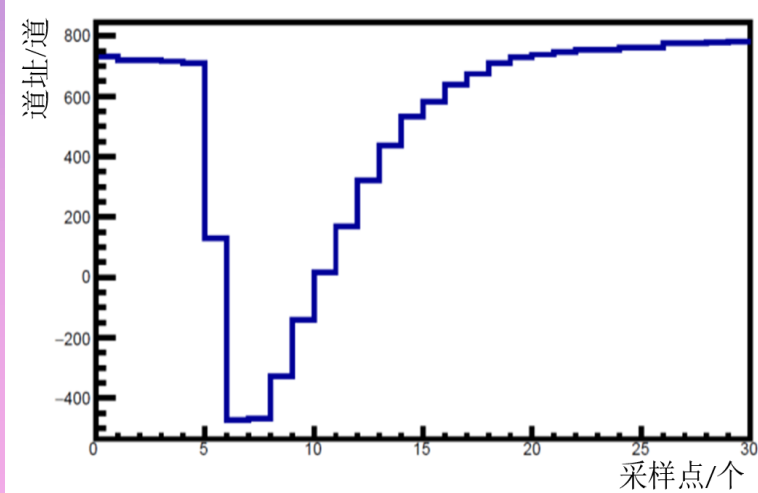


测试系统框图

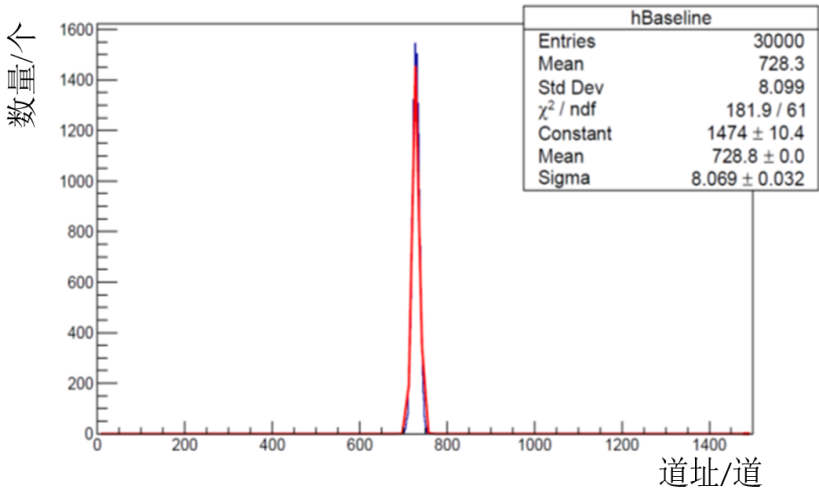
◆ 测试结果

- 信号波形重建测试：
前沿包含两个采样点（50 ns）与芯片参数相符。
- 系统噪声测试：
ENC为0.16 fC，满足原型电子学系统好于1.3 fC的指标需求。
- 电荷分辨测试：
20 fC输入下电荷分辨精度约为0.13fC，满足要求。

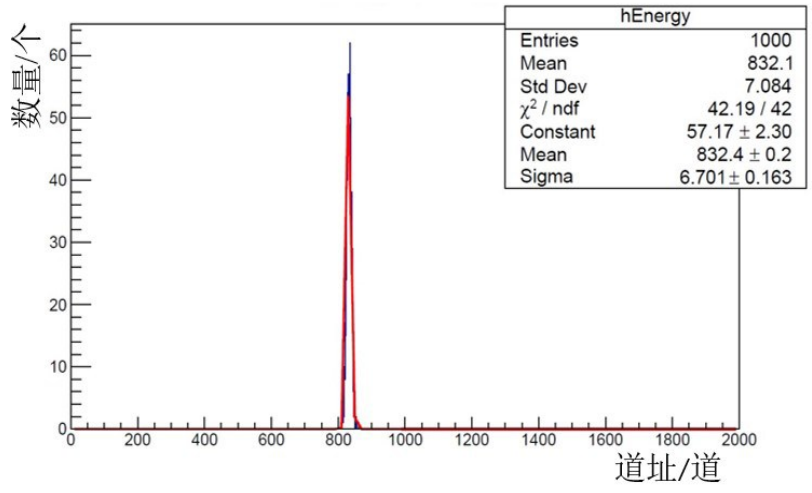
输入电荷 (fC)	电荷分辨 (单峰模式)	电荷分辨 (多峰模式)
4	2.5%	3.1%
8	1.3%	1.4%
12	0.8%	0.8%
16	0.67%	0.68%
20	0.48%	0.45%



信号波形重建图 (20 fC)



实验室基线噪声谱



电荷分辨谱

◆ 测试结果

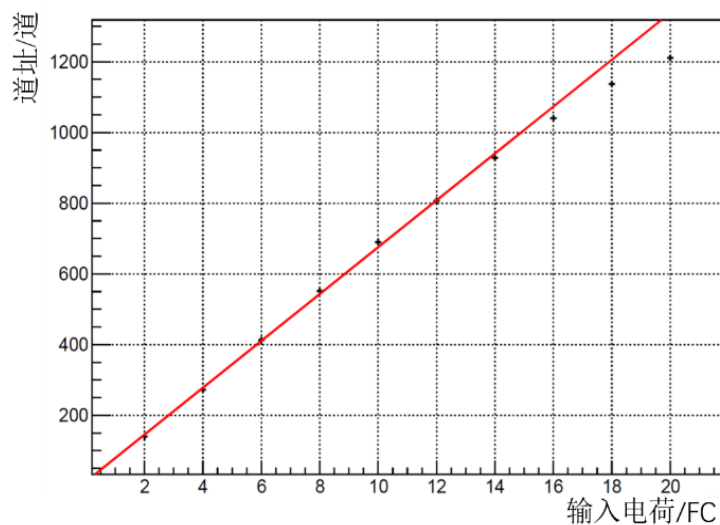
➤ 积分非线性测试：

在0-20fC内单峰模式下积分非线性指标要优于多峰模式，好于2.6%。

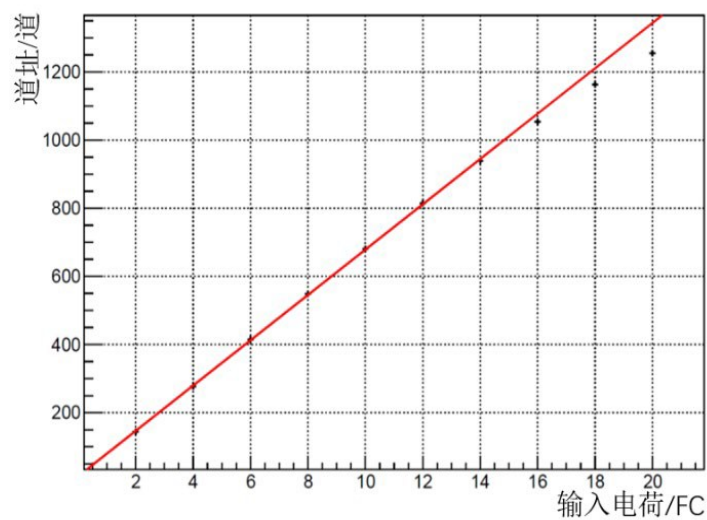
在0-12fC，线性拟合度很高，测试结果好于0.26%。

➤ 通道一致性测试：

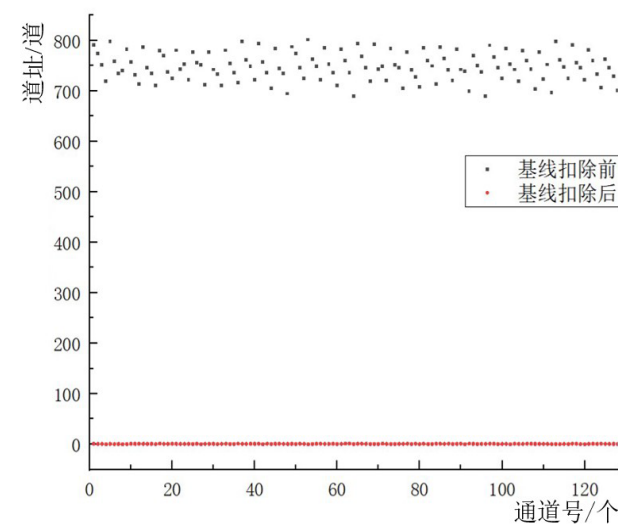
通过基线扣除方法，可实现较好的通道一致性。



线性拟合图(多峰模式)

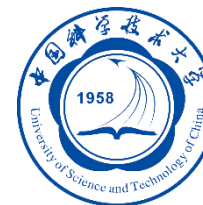


线性拟合图(单峰模式)



通道一致性散点图

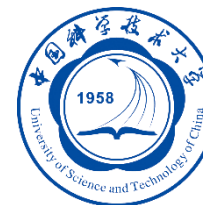
实验室测试总结



◆ 测试结果满足指标要求

系统指标类型	具体要求参数	实测参数
总读出通道	1024通道	1024通道
计数率	大于10 kHz	最高150 kHz
等效噪声电荷	小于1.3 fC RMS	小于0.16fC RMS
电荷测量动态范围	20 fC	20 fC
积分非线性	小于4%	小于2.6%（单峰模式）

联合探测器测试

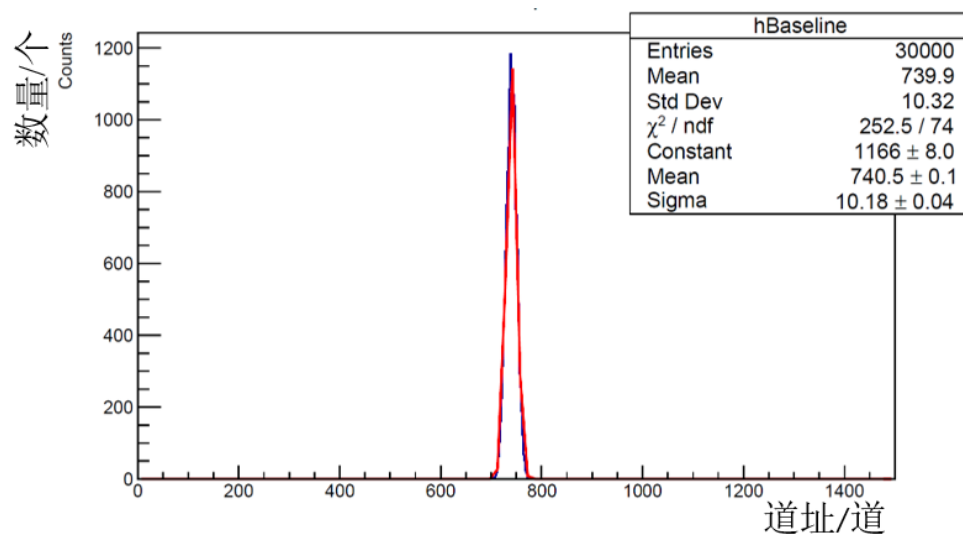


◆ 探测器现场组成

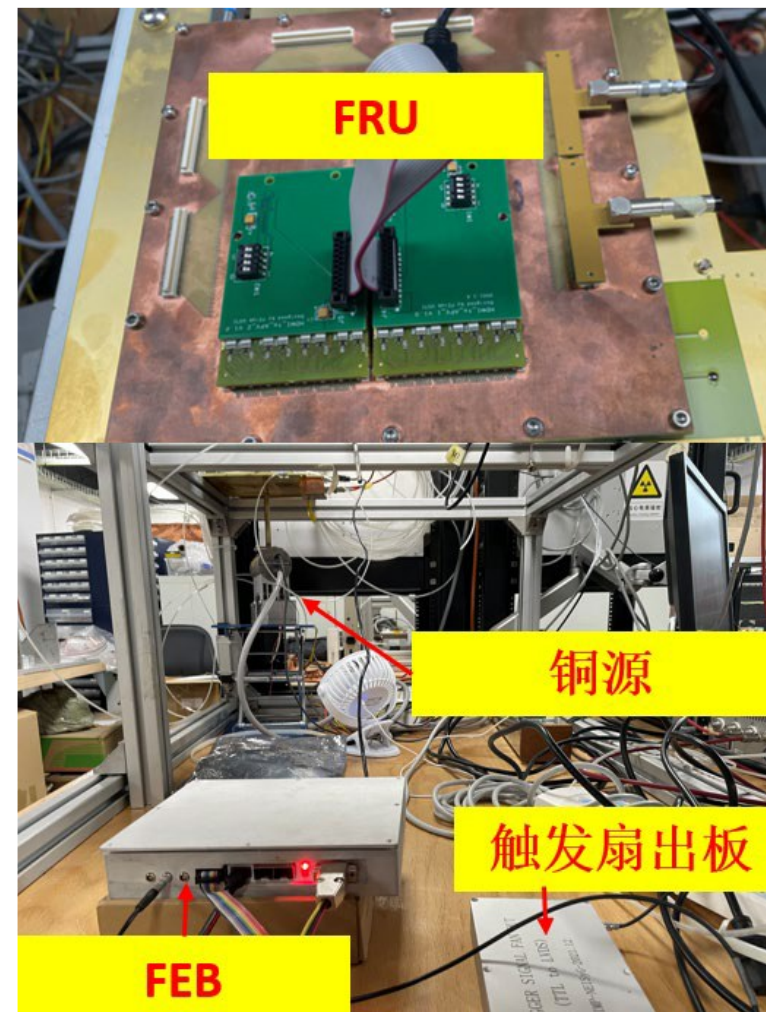
- 探测器测试现场包括X射线源、 μ RGroove探测器和原型电子学系统。如图所示，X射线源使用牛津仪器公司的XTF5011型X光机，通过加速电子轰击铜靶产生特征X射线。

◆ 联合探测器系统噪声

- 在联合探测器测试中，将电子学系统连接探测器后得到的基线谱如图所示，系统噪声略微变大，达到0.2 fC。



探测器基线噪声谱



探测器测试现场图

摘要



综述

探测器

读出电子学

前端读出芯片

总结

前端读出芯片的挑战



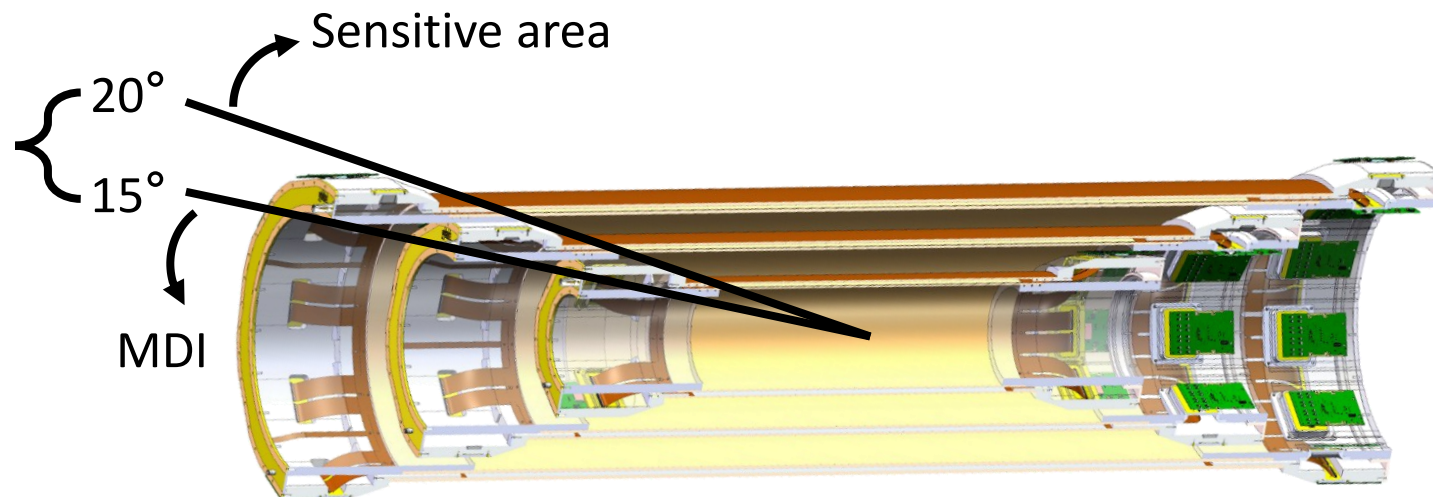
1. 读出电子学空间受限



- 高集成度



- 采用专用集成电路芯片 (ASIC)
 - 多通道集成
 - 片内信息提取与数字化



2. 高计数率能力 (单通道极限计数率高达4 MHz)

3. 数十pF输入电容下实现微弱信号 ($\sim$ fC) 放大



定制化 ASIC

前端读出芯片的挑战



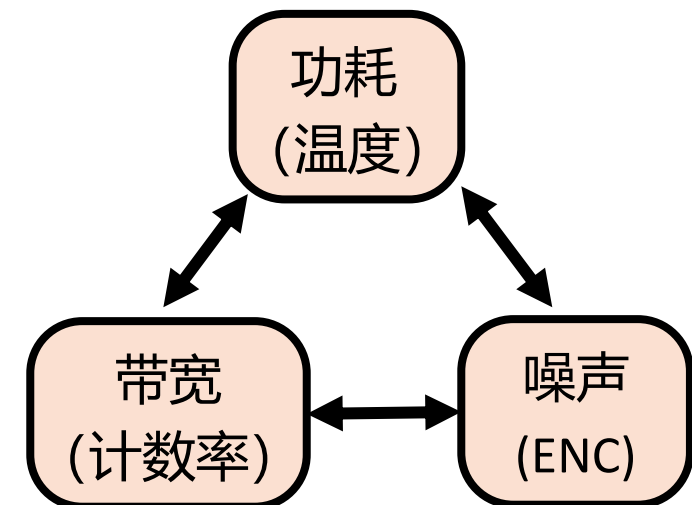
- 为了满足气体型内径迹探测器的读出需求，有必要采用定制化的专用集成电路芯片，其需要满足：

- 高集成度
- 低噪声
- 高计数率能力

➔ 原理验证芯片32通道，最终版本64通道
片内提取信息并数字化

➔ 对模拟调理电路和信息提取电路构架进行针对性优化

参数	设计需求
单芯片通道数	64 通道
单通道极限计数率	4 MHz
电荷测量上限	40 fC
等效输入电荷噪声 (ENC)	$\leq 0.5 \text{ fC RMS @ } 35 \text{ pF } C_{in}$
电荷测量精度	$\leq 1 \text{ fC RMS}$
时间测量精度	$\leq 10 \text{ ns RMS}$

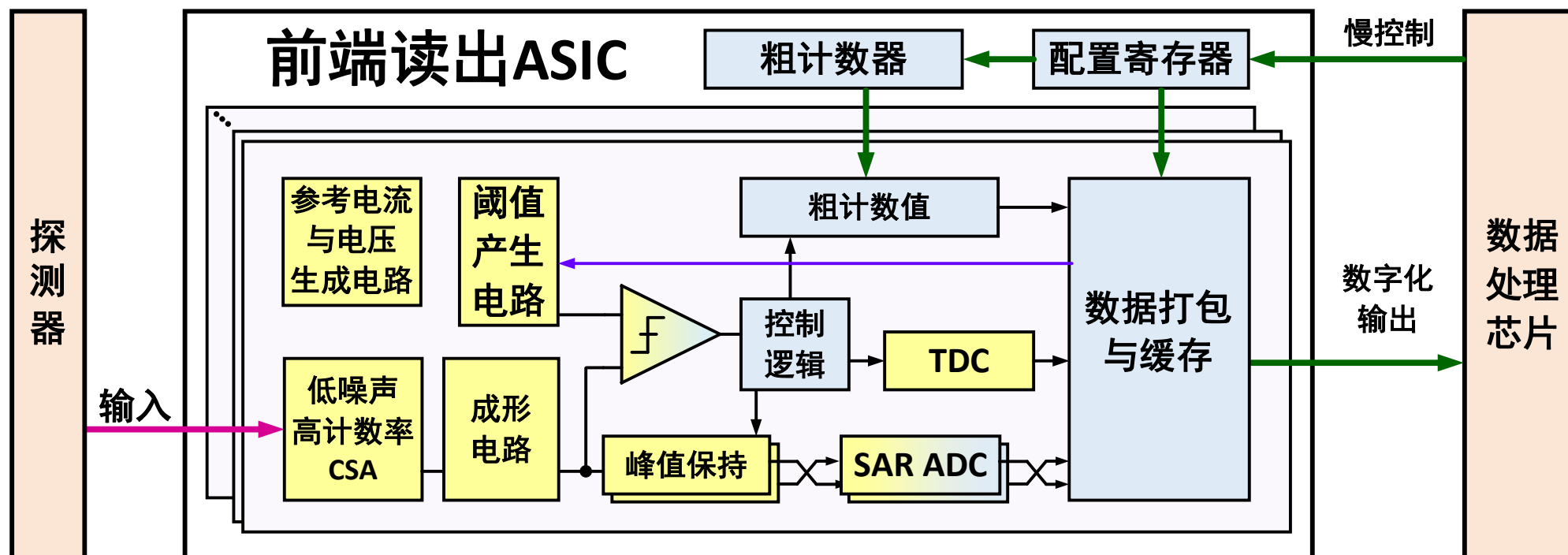


芯片基本构架



原理验证芯片集成32个通道，每通道包含：

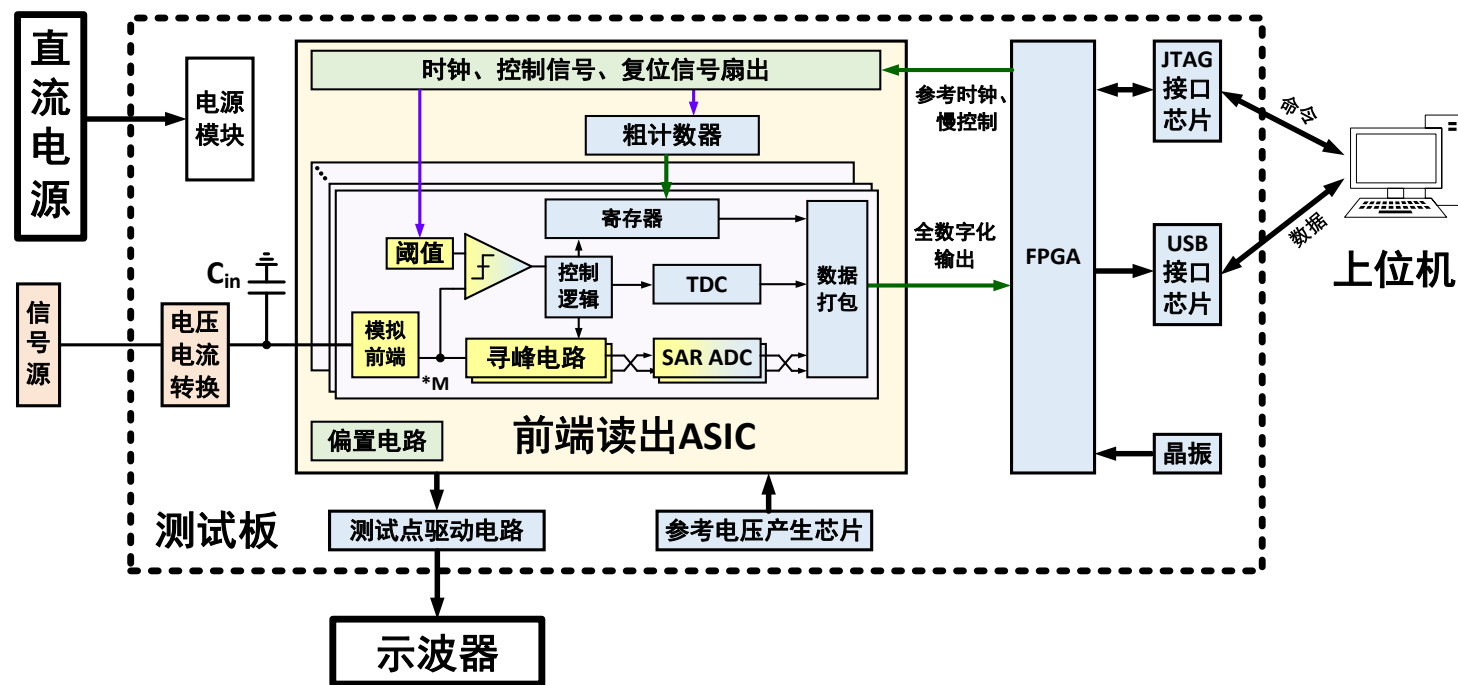
- 电荷灵敏放大器（CSA）+ 成形电路 $\longrightarrow$ 微弱信号低噪声放大
- 峰值保持 + 模数转换器（ADC） $\longrightarrow$ 电荷测量
- 甄别器 + 时间数字转换器（TDC） $\longrightarrow$ 时间测量



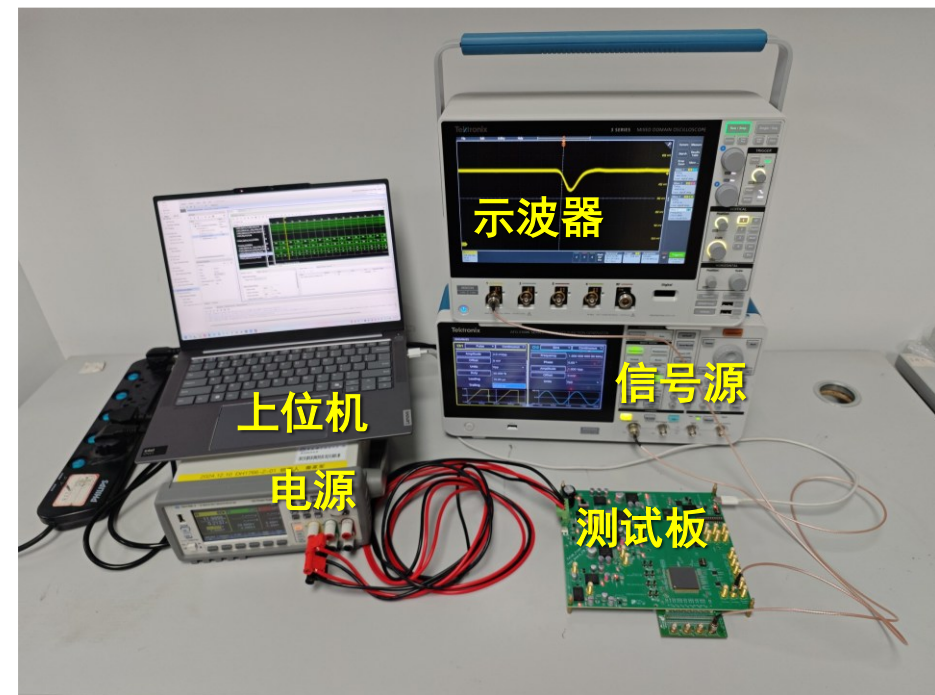
测试平台构建



- 在芯片完成流片、封装与测试板焊接后，对其性能进行测试
- 使用信号源结合电压电流转换电路模拟探测器输出电流信号



测试平台框图

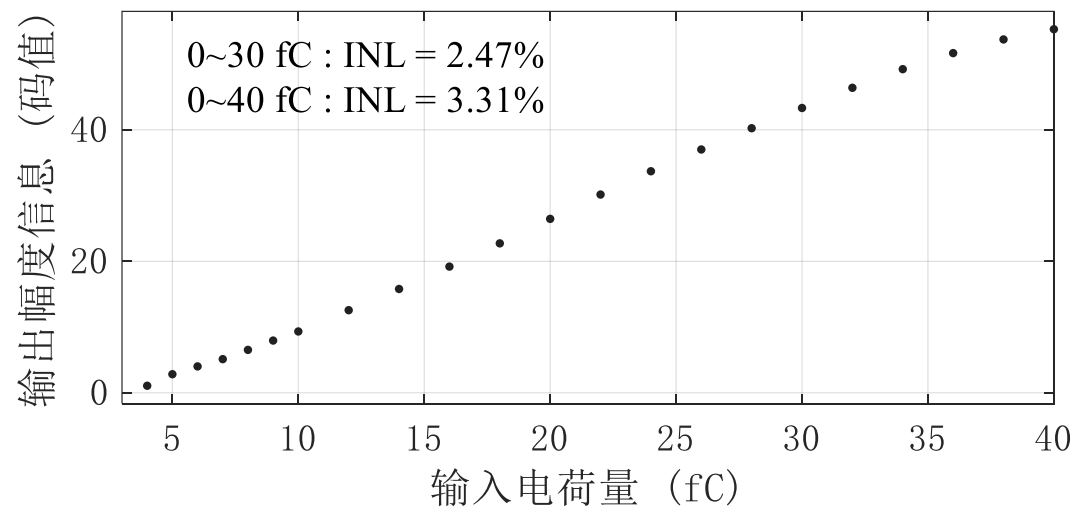
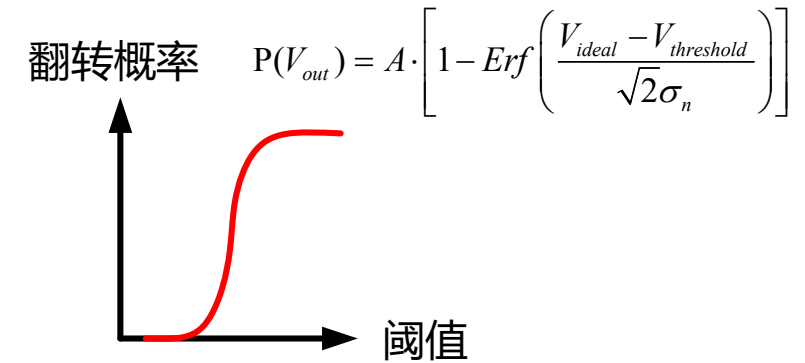


测试现场照片

传输特性曲线与噪声测试

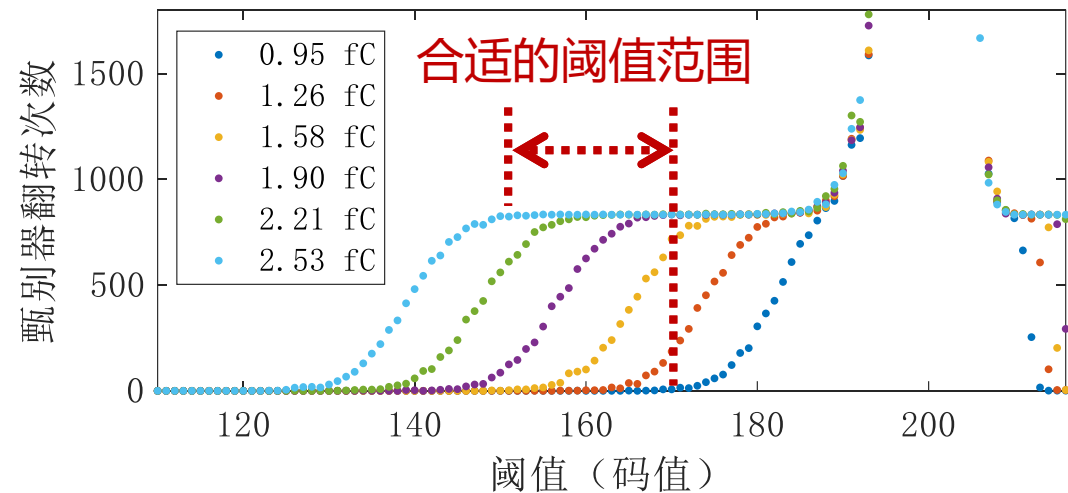


- 在全动态范围内积分非线性好于3.4%。
- 使用S-curve方法对芯片的基线噪声进行测试，当阈值码值设置在150 ~ 170范围内时，能在较低的误触发率下对75 ns电荷收集时间的2.5 fC信号实现较高的探测效率。



传输特性曲线

@ 35 pF输入电容 @ 75 ns电荷收集时间



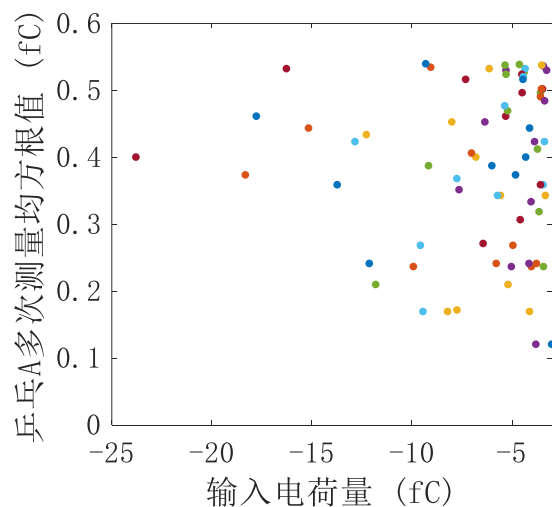
在固定时间内不同阈值下的甄别器翻转次数

@ 35 pF输入电容 @ 75 ns电荷收集时间

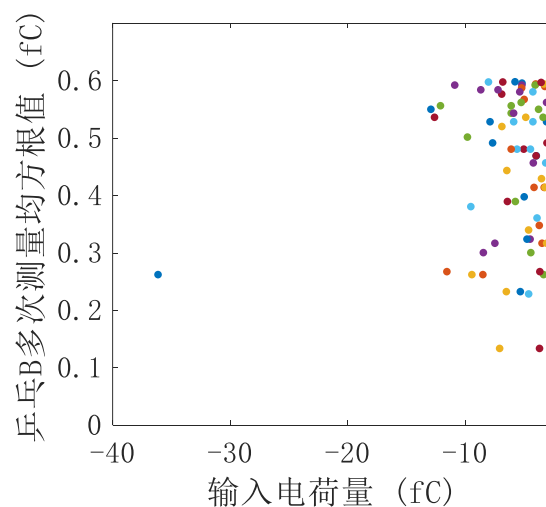
电荷与时间精度测试



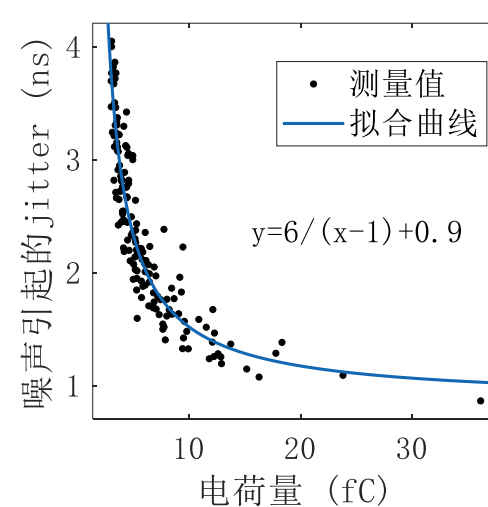
- 为了更合理评估芯片性能，使用GENT4模拟波形作为测试输入，在35 pF输入电容下对电荷测量精度和时间测量精度进行测试。
- 测试结果显示，电荷测量精度好于1 fC RMS，时间测量精度好于10 ns RMS，满足设计指标需求。通过幅度信息可对时幅游走效应进行修正，进一步提升时间测量精度。



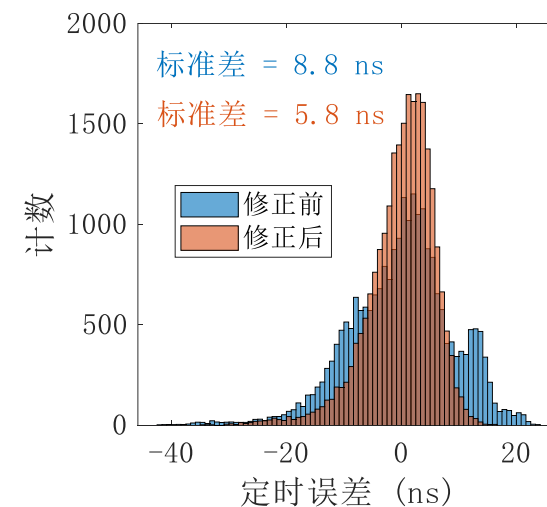
乒乓通道A电荷测量精度
随输入电荷量的关系



乒乓通道B电荷测量精度
随输入电荷量的关系



噪声引起的时间抖动
与电荷量间关系

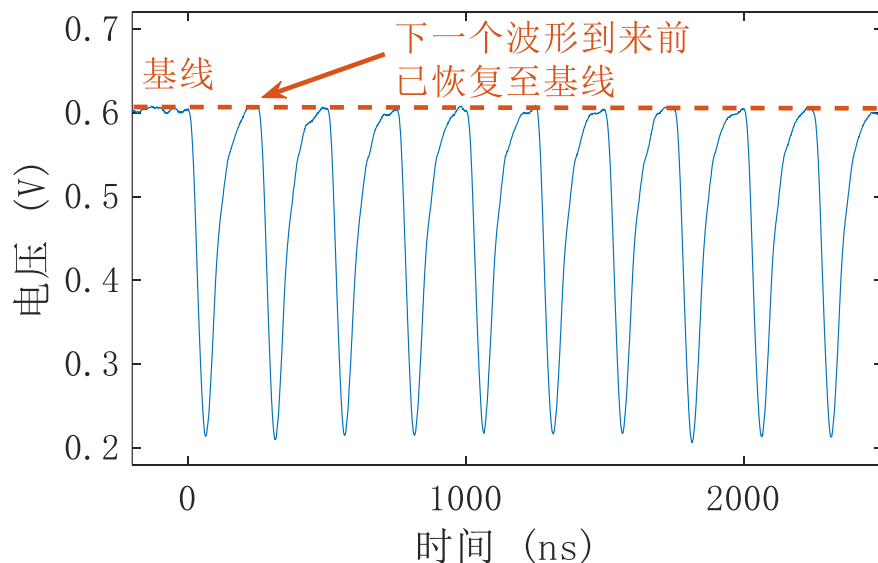


根据幅度值对定时信息
进行修正后的结果

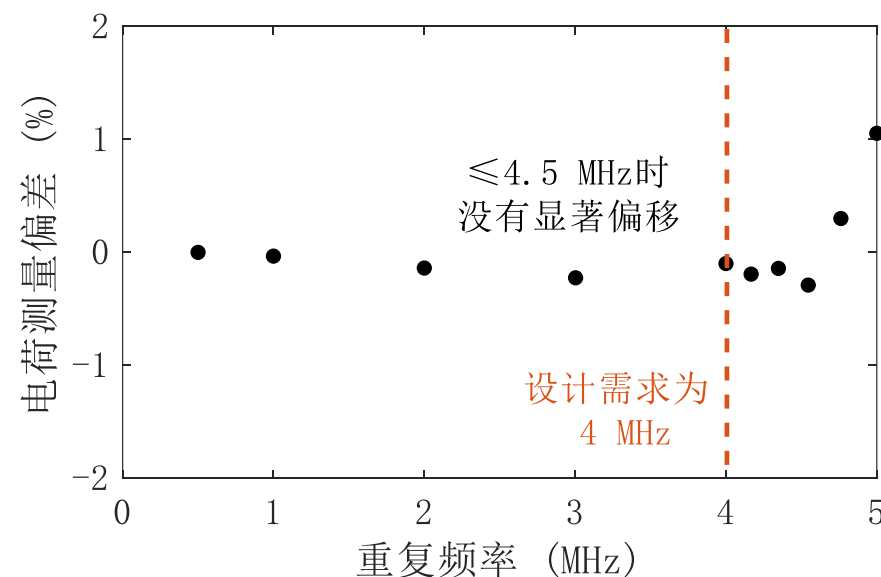
计数率能力测试



- 向芯片以4 MHz极限计数率连续注入满量程信号
 - 模拟调理电路输出无堆积
 - 电荷测量无显著漂移
- 表明芯片极限计数率满足设计需求



4 MHz计数率下模拟调理电路输出波形



芯片输出计数率与输入计数率关系

摘要



综述

探测器

读出电子学

前端读出芯片

总结

总结



- 完成了第一版本C- μ RGroove原型的设计与测试
- 完成了基于APV25芯片的读出电子学原型设计与测试
- 完成了原理验证前端读出芯片的设计与测试
- 正在展开进一步优化设计工作

向Rui及其团队在探测器研发和生产方面给予的支持、以及Eraldo及其团队在束流测试过程中的帮助表示诚挚的感谢!!!



Backup

