



Topmetal像素直接读出 气体径迹探测器研发与径迹测量研究

常悦, 孙向明, 祁辉荣

华中师范大学PLAC实验室, 中国科学院高能物理研究

2026年8月12日

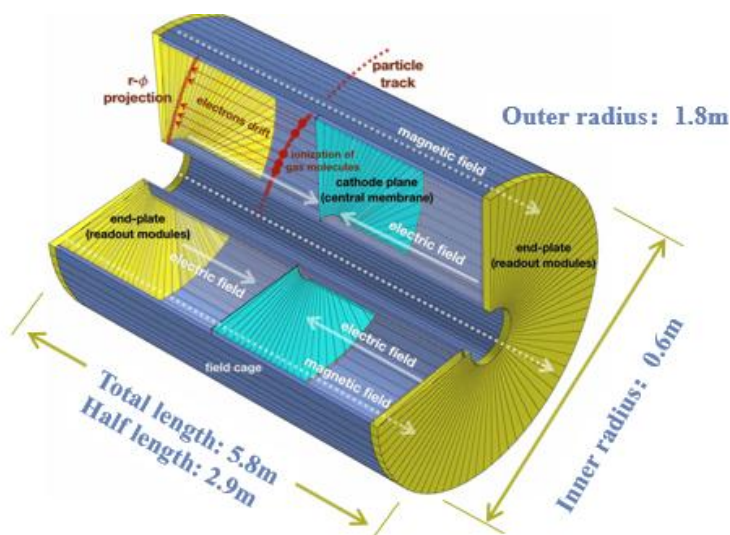
内容提要

- 1.** 气体径迹探测器的物理需求与关键技术
- 2.** Topmetal芯片及其应用
- 3.** Topmetal气体径迹探测器研究方案
- 4.** 工作总结与展望

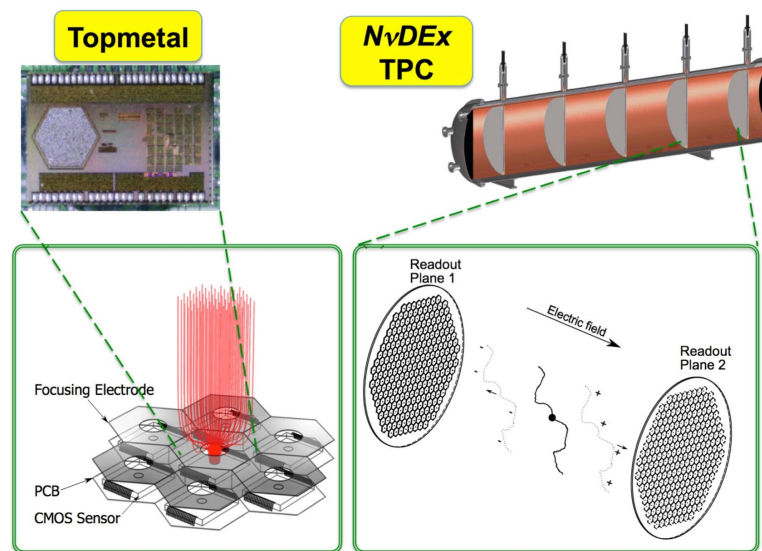
高精度径迹探测的物理需求

■ 高能核物理、中微子物理、暗物质等前沿粒子物理实验要求径迹探测器提供更多、更高精度的物理信息

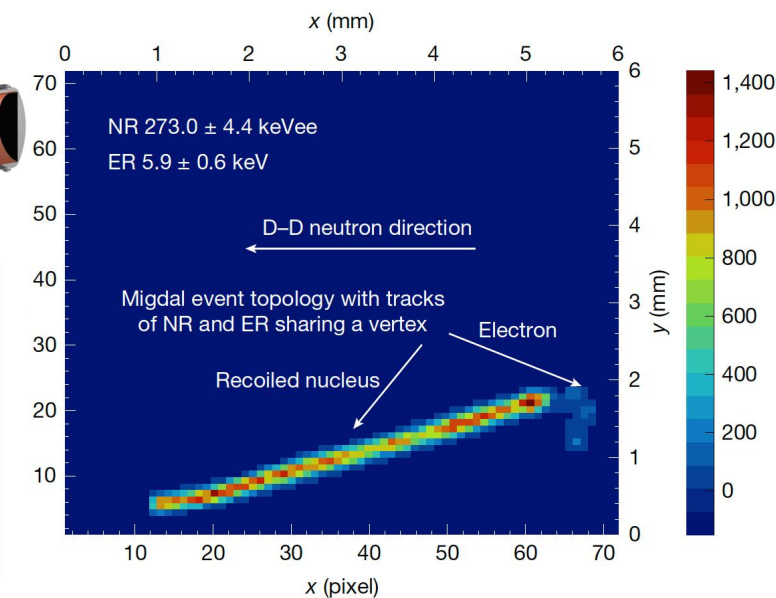
- 电离簇团计数 $dN/dx \rightarrow$ 提升粒子鉴别潜力 (CEPC-TPC π/k 3σ @ 20GeV) ;
- 多径迹关联信息 $\rightarrow$ 识别径迹的共同顶点结构;
- 径迹长度、方向信息 $\rightarrow$ 结合能量判断粒子种类、重建入射粒子



CEPC-TPC



NvDEx-100高压 TPC概念设计,
利用精细电荷读出识别 $0\nu\beta\beta$ 候选径迹并抑制本底



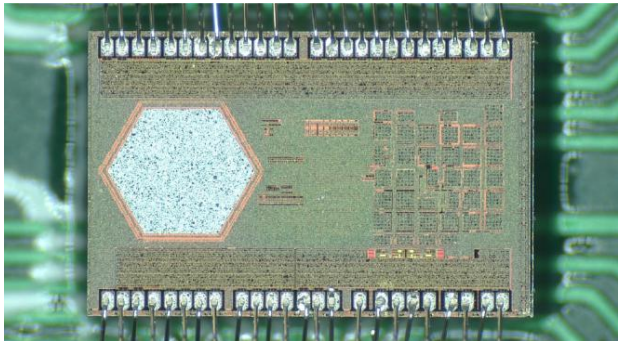
利用Topmetal-GMCP观测到的
Migdal效应的共顶点结构

气体径迹探测器的关键技术

观测量	物理用途	探测器要求
低能量沉积	低能电子/核反冲	低噪声、低阈值、高收集效率
短径迹结构	短程带电粒子	高粒度像素、低扩散、高信噪比
局域电荷密度	粒子鉴别/末端特征	逐像素电荷、足够动态范围
共同顶点/多径迹	关联事例识别	高精度二维成像
径迹方向	方向性测量	足够采样点及必要时间信息
大规模运行	稳定低本底	均匀、低功耗、可扩展

- 高粒度读出 → 用于保留径迹结构、原初电离簇团结构
 - 低噪声、宽动态范围 → 探测弱电离信号
 - 大面积电荷读出 → 提取长径迹信息与电离密度
 - 关键技术难点：

倍增结构与高粒度读出单元的可靠集成；
功耗和散热；
阵列拼接与大面积拓展.....
- Pad 读出 → 像素型读出

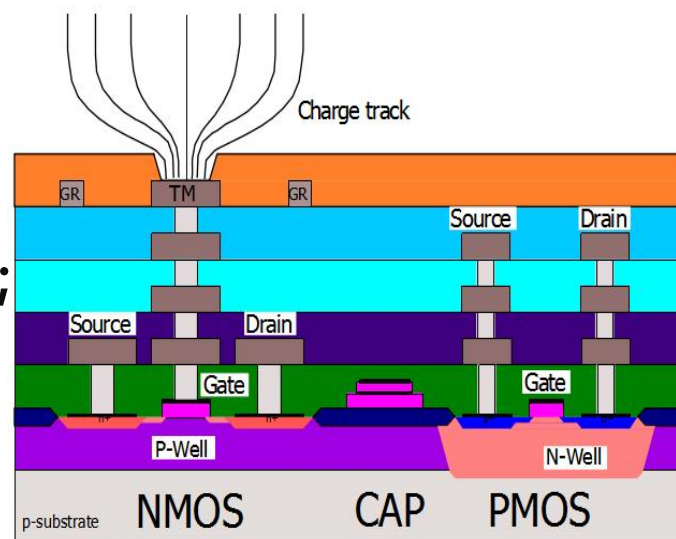
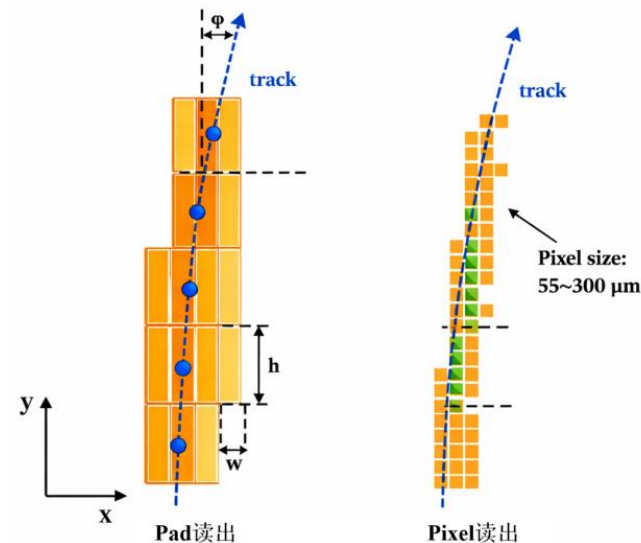


气体径迹探测器的关键技术

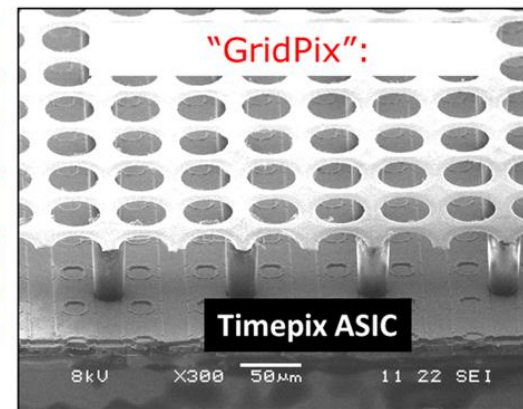
- 传统的毫米级Pad读出难以解析原初电离结构，仅测量电离能损信息；
- 高粒度像素读出为 dN/dx 研究提供可能
- GridPix技术（ $55\ \mu\text{m}^2$ Timepix）代表了国际像素型读出的先进方案；
 - 初步实现 $dN/dx \sim 2.9\% @ 1\text{T}$ ，初步验证了像素型读出的优势
 - 功耗 $\sim 2\text{W}/\text{cm}^2$
 - 大面积应用受限于芯片尺寸
 - MEMS技术 & 高端光刻胶（SU8）限制

- Topmetal为高精度径迹研究提供读出方案

- 核心特点：芯片最顶层的金属层开窗，做成电极；
- 直接收集原初电离电荷，也可读出倍增电荷；
- 极低噪声（ENC 可低至十几个电子）

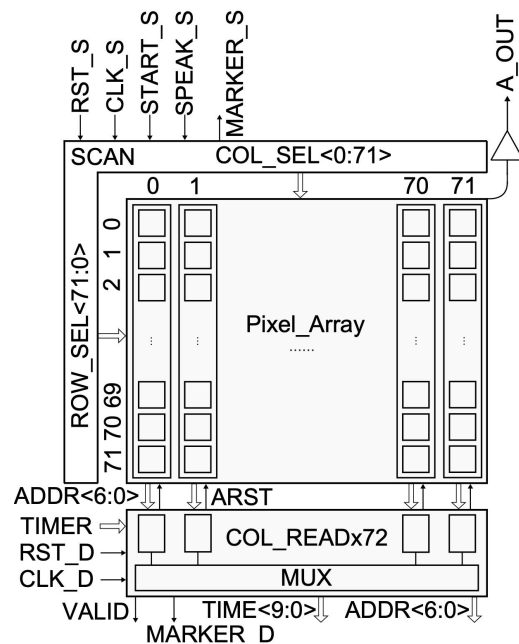
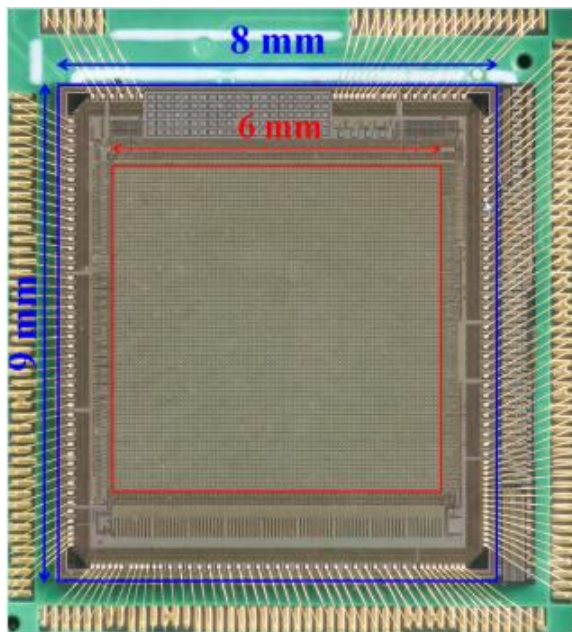


Topmetal工作原理示意图



Gridpix技术方案

Topmetal: 像素化电荷直接收集与成像



Topmetal II
ENC ~ 13.9 e⁻

单个像素尺寸: 83 × 83 μm²

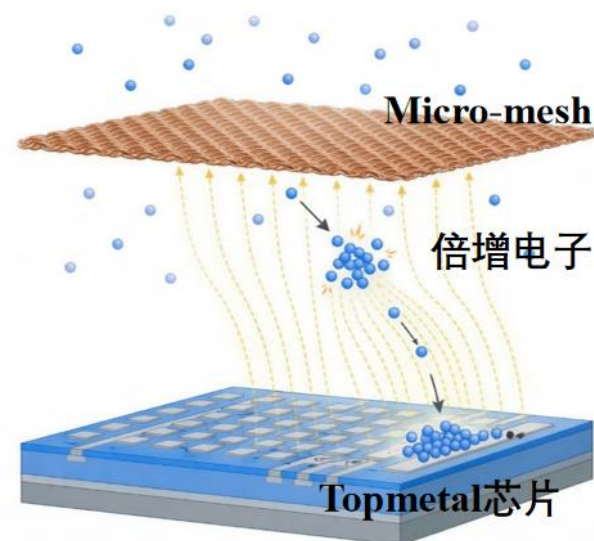
阵列大小: 72 × 72

电荷敏感区: 6 × 6 mm²

单个像素电极尺寸: 25 × 25 μm²

Topmetal 应用于气体探测器优势

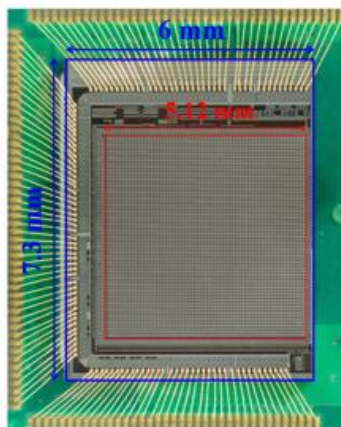
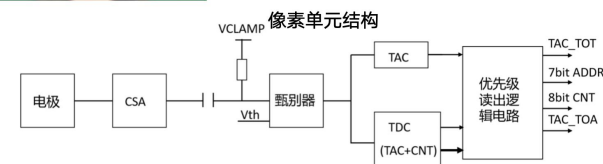
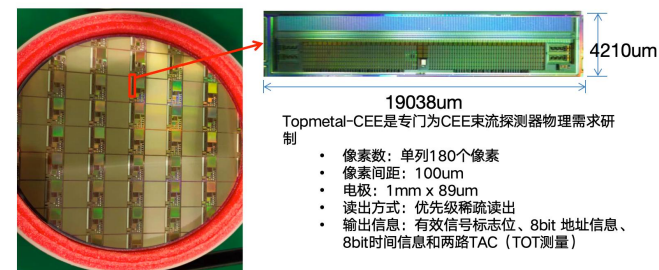
- 低噪声、低功耗 (~ 0.2 W/cm²)
- 易实现与GEM/Micromegas/GMCP耦合
- 大面积阵列化
- 像素尺寸可优化



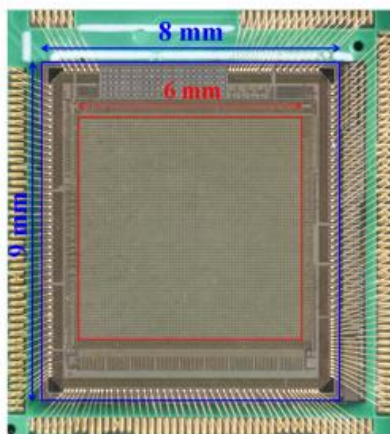
Topmetal-Micromegas级联工作原理

Topmetal系列芯片的应用

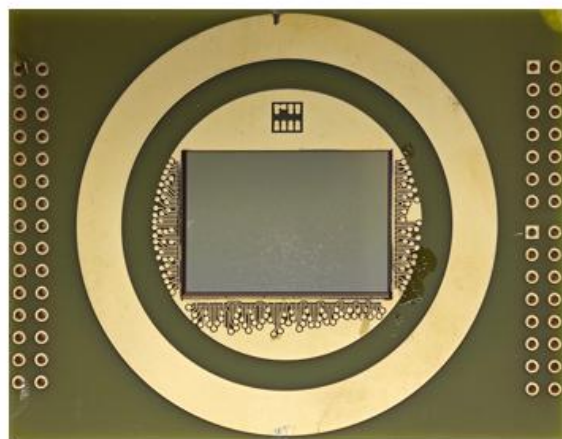
- Topmetal已在Migdal效应观测、CXPd立方星有效载荷，CEE实验探测器研发、NvDEx等实验中得到应用和验证；
- 应用已覆盖空间辐射探测、核物理与稀有事例探测；
- 展现了其对弱电荷信号进行收集与高精度径迹探测的潜力。



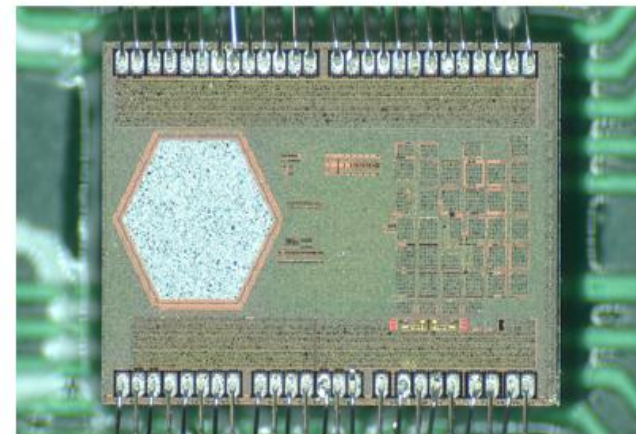
Topmetal-I



Topmetal-II



Topmetal-L



Topmetal-S

Topmetal直接读出探测器的关键技术

- Topmetal读出性能验证;
- 倍增器件与Topmetal的有效耦合 → 芯片、倍增结构和读出系统的联合优化
- 大面积阵列化 → 芯片拼接、数据一致性、功耗和长期稳定性

研究一 | Topmetal无倍增直接读出

核心问题：Topmetal能否
直接测量气体原初电离电荷

优势：

- 结构简单;
- 无倍增涨落;
- 电荷分布更接近原初电离信息;
- 不存在放电问题。

局限：

- 受电子学噪声限制;
- 更适合 α 等大电离信号;

研究二 | MPGD倍增-Topmetal读出

核心问题：验证Topmetal与MPGD的集成路径
优势：

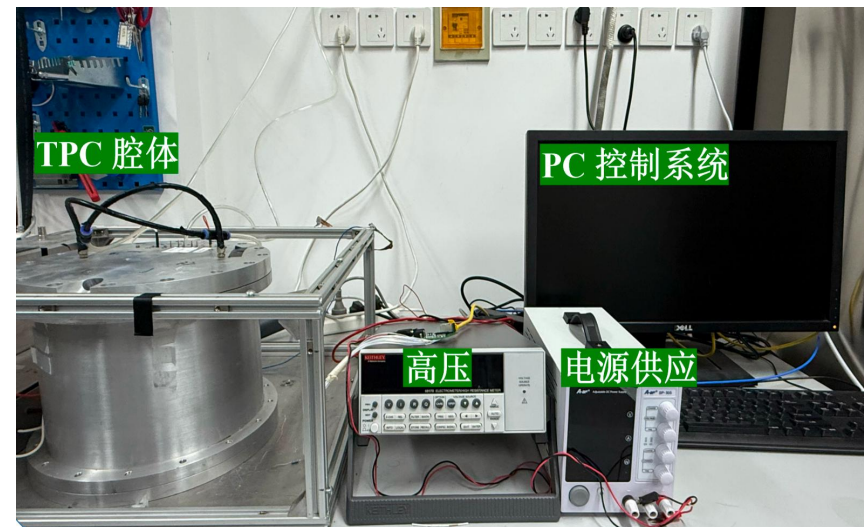
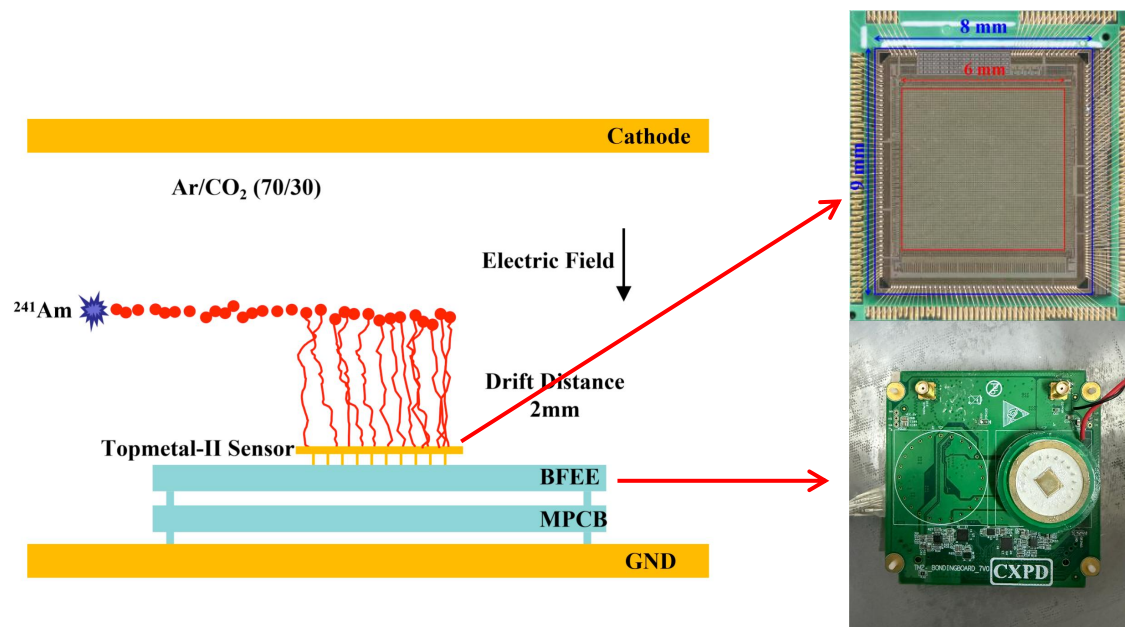
- 降低系统有效探测阈值;
- 扩展至低能电子和核反冲等弱电离信号;
- 可通过调节MPGD电压改变系统响应。

关键技术难点：

- Topmetal数据收集、缓存、输出;
- 放电过程中对CMOS芯片的保护
- 大面积拓展应用
-

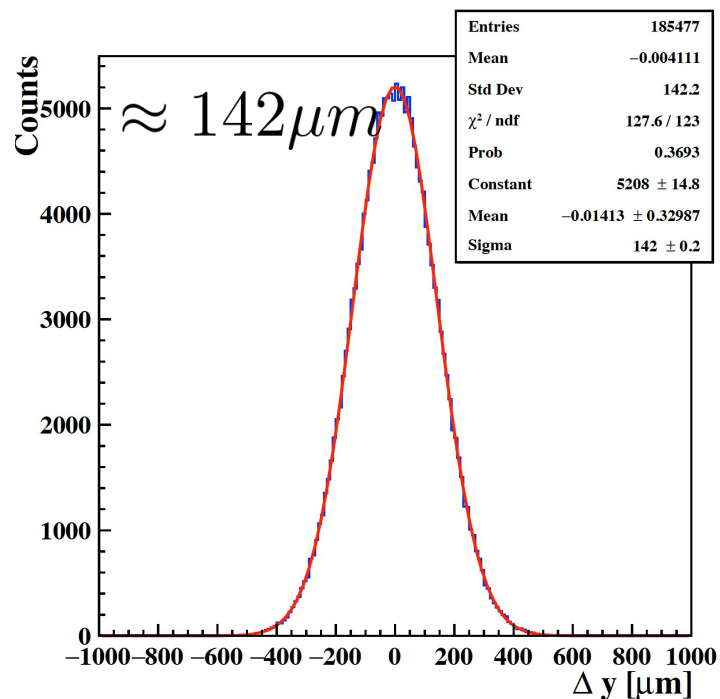
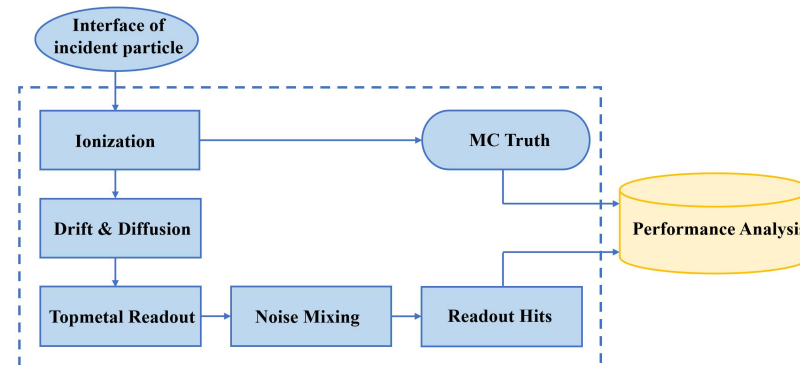
研究一：Topmetal无倍增直接读出

- 验证Topmetal对气体原初电离电荷的直接收集与二维径迹成像能力。
 - 工作气体: $\text{Ar}/\text{CO}_2 = 70/30$
 - 漂移距离: 2 cm
 - α 放射源: ^{241}Am , 5.49 MeV
 - 读出: Topmetal-II CMOS 传感器
- 像素阵列: 72×72
- 像素间距: $83 \mu\text{m}$
- 读出方式: 正离子直接收集, 无气体倍增

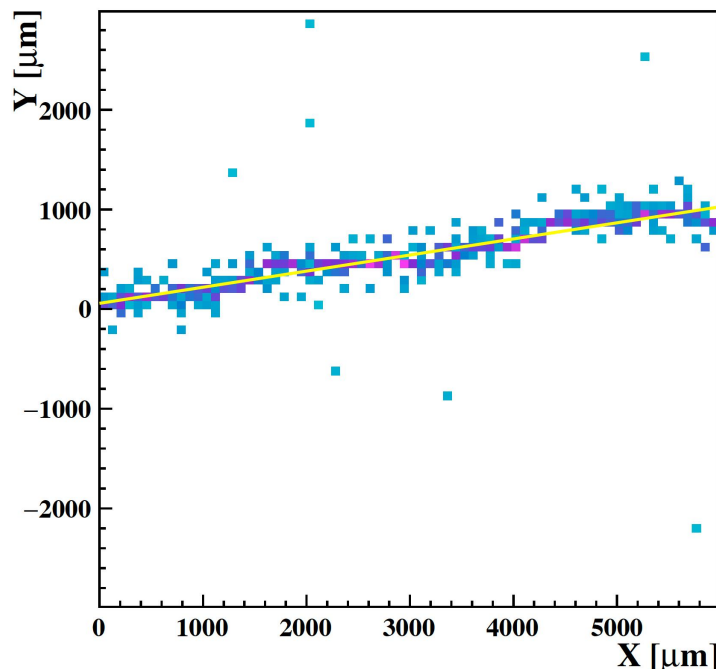


研究一：Topmetal无倍增直接读出

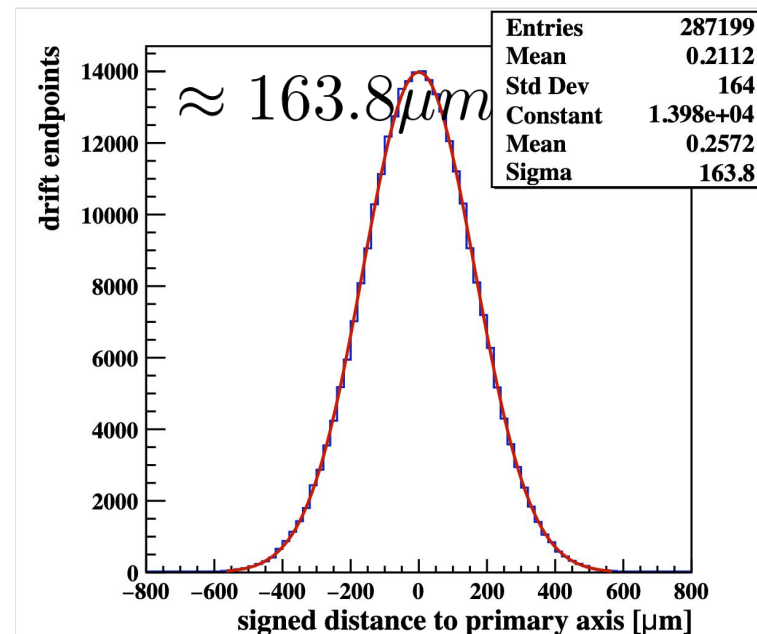
- 正离子在低场条件下接近热扩散;
- 模拟参数与实验保持一致:
 $T=293\text{ K}$ 、 $L=2\text{ cm}$ 、 $E=500\text{ V/cm}$
- Srim电离→Garfield漂移、扩散→像素响应→噪声与阈值→SVD拟合



正电荷漂移前后的扩散统计



漂移正电荷引起的像素响应



SVD拟合后统计得到的径迹
横向分布

研究一：Topmetal无倍增直接读出

- 从Topmetal采集的二维像素电荷图像中提取真实径迹信号，并定量测量径迹的横向宽度

原始数据校正

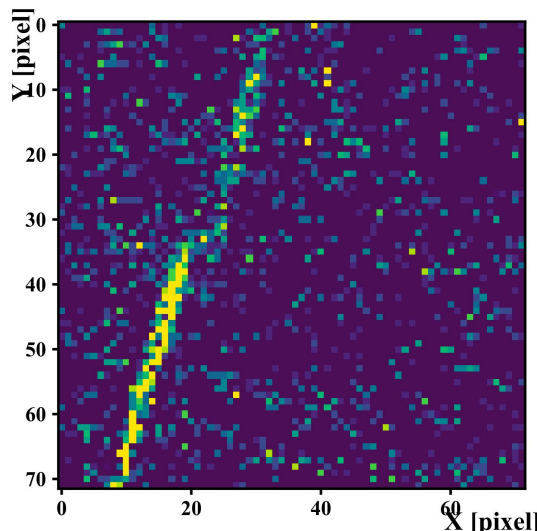
有效信号筛选

径迹重建算法

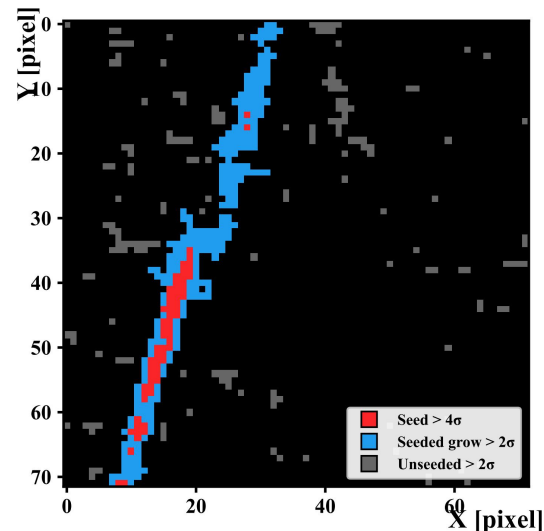


SVD拟合

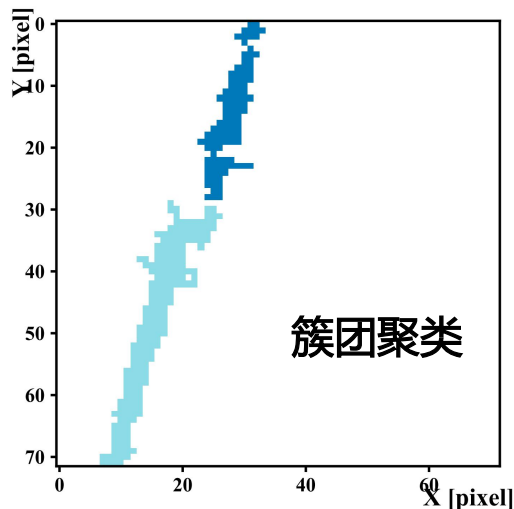
径迹宽度统计



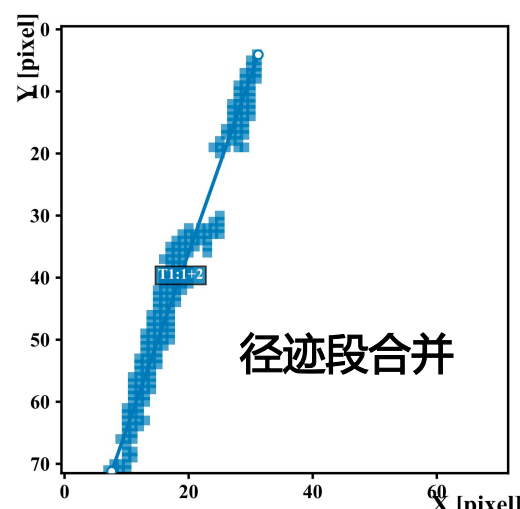
Topmetal II直接测得到的电离径迹



双阈值像素筛选



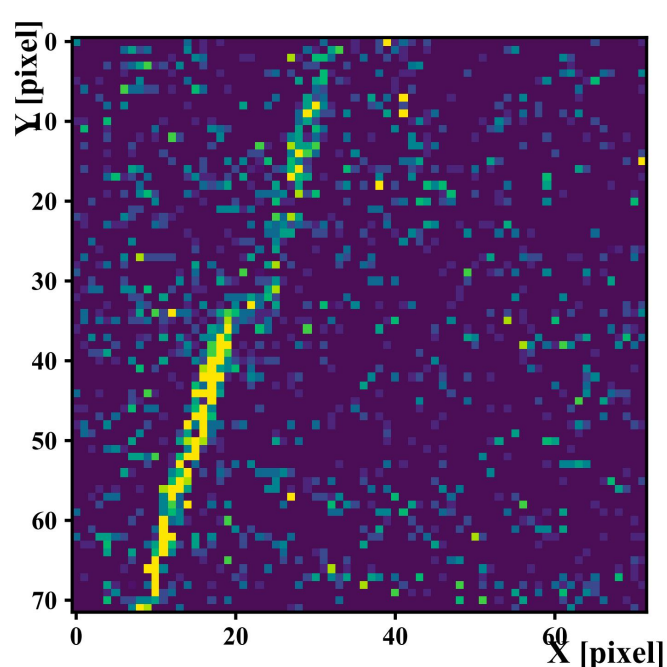
簇团聚类



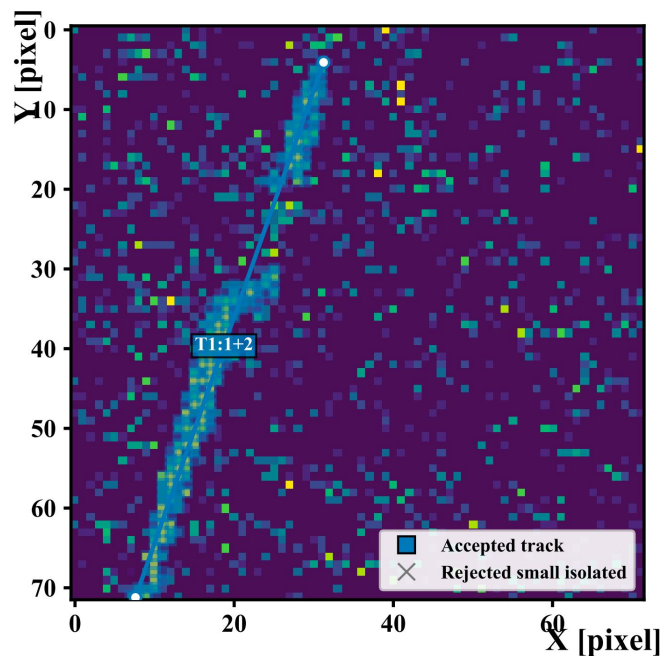
径迹段合并

研究一：Topmetal无倍增直接读出

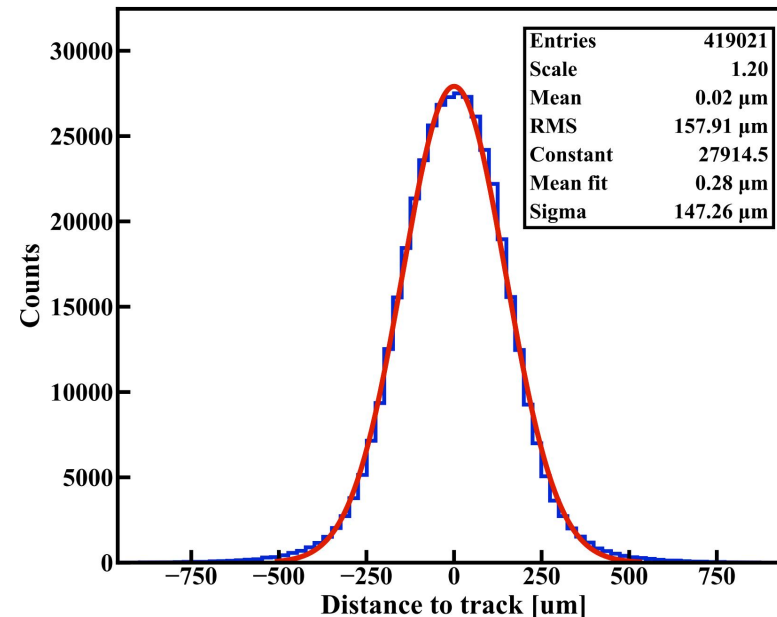
- 从Topmetal采集的二维像素电荷图像中提取真实径迹信号，并定量测量径迹的横向宽度



Topmetal II直接测量得到的
电离径迹



径迹重建结果



SVD拟合后统计得到的径迹
横向分布

漂移扩散 $\approx 142\mu\text{m}$



模拟重建宽度 $\approx 163.8\mu\text{m}$

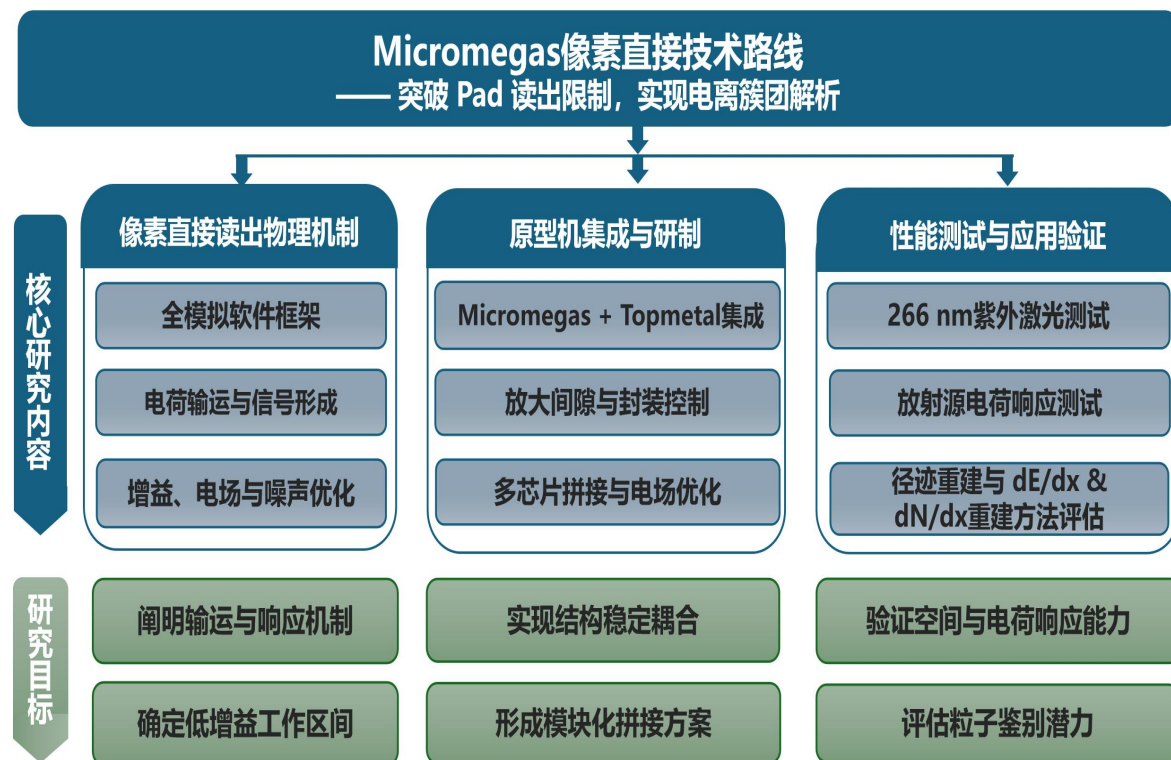


实验重建宽度 $\approx 147.3\mu\text{m}$

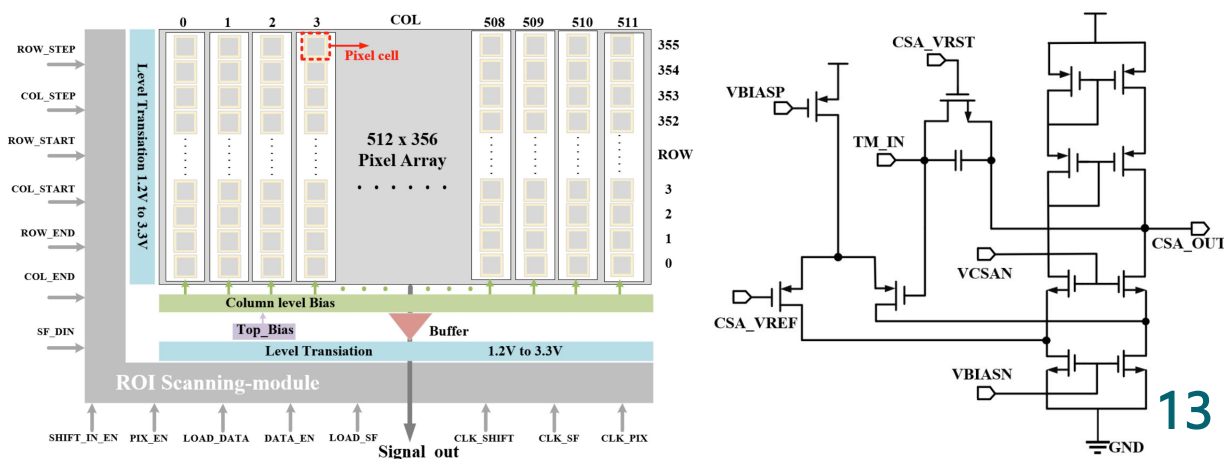
Topmetal在无倍增条件下实现了电离径迹的定量测量
避免了雪崩过程引入的增益涨落和附加横向展宽，验证其在气体探测器应用中的良好特性

研究二：MPGD倍增-Topmetal读出

- 引入MPGD倍增，可将弱电离信号放大至Topmetal可探测范围；
- 已有基础：Topmetal系列芯片的读出与系统稳定性已在CXPD中得到初步验证；
- 验证Topmetal-L与GEM的级联方案，探索级联Micromegas大面积应用可行性

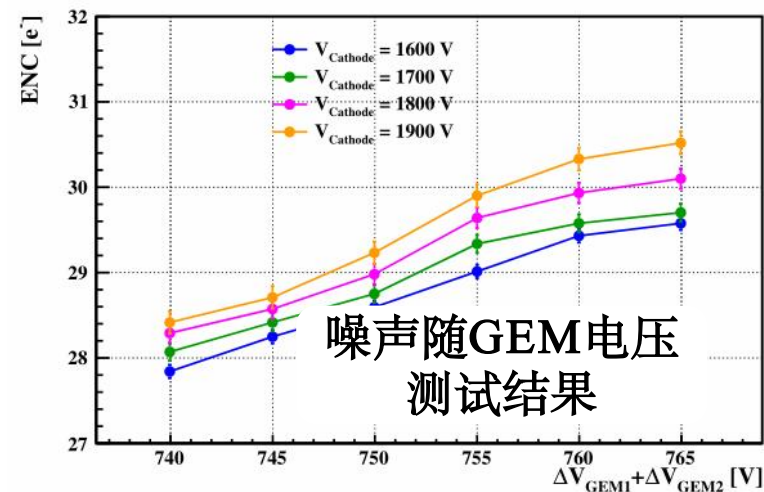
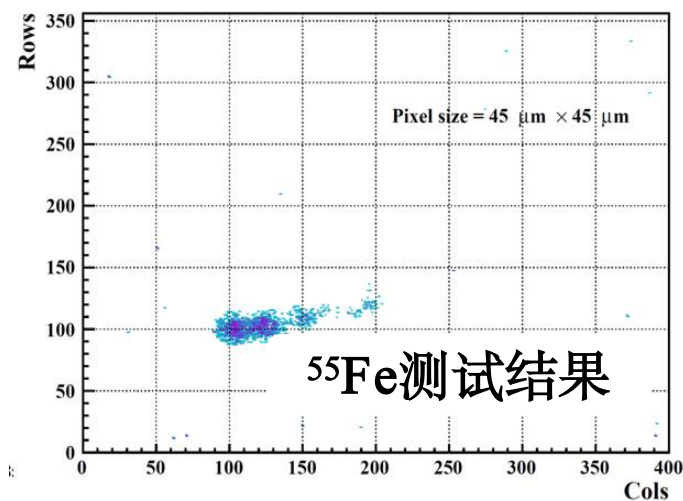
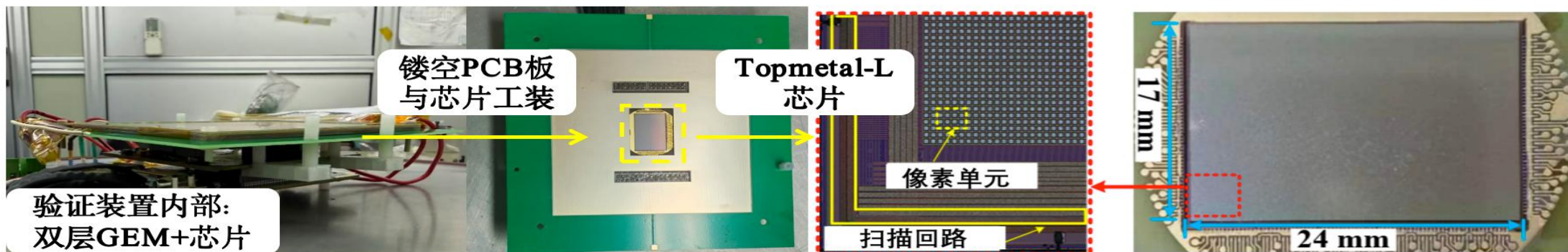


- Topmetal-L: 像素阵列: 356×512
- 像素尺寸: $45 \mu\text{m}$
- 功耗: 0.195 W/cm^2 ENC $\sim 22.8e^-$



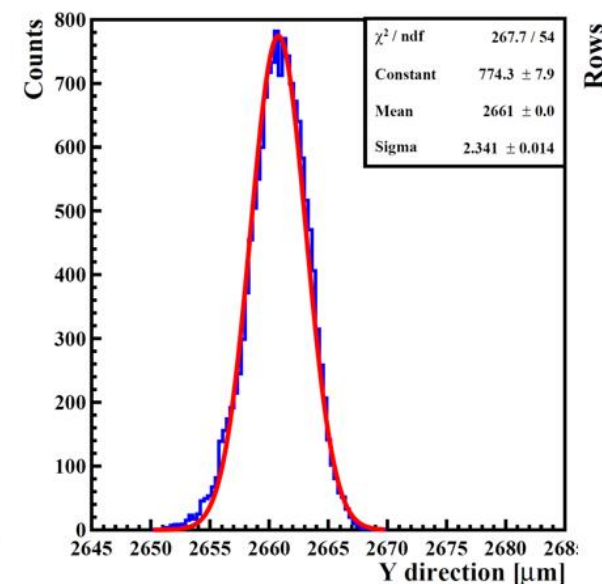
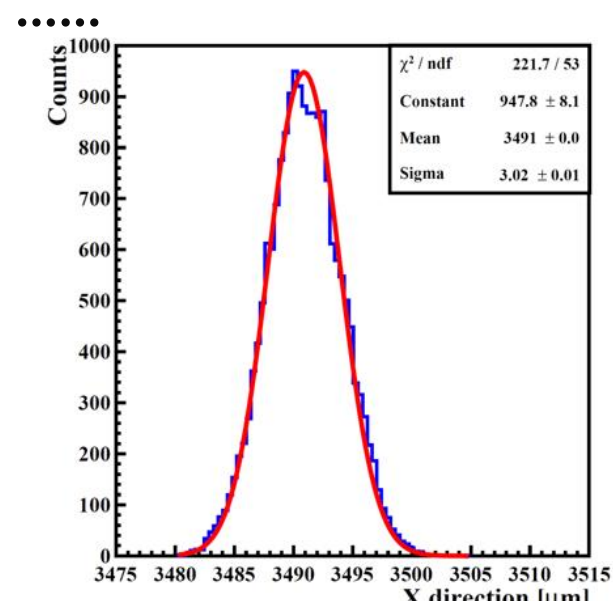
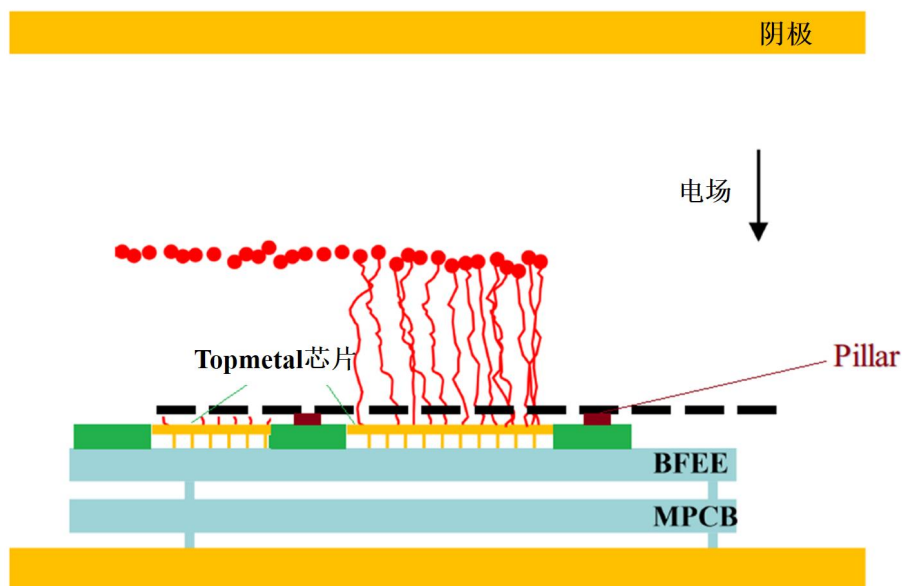
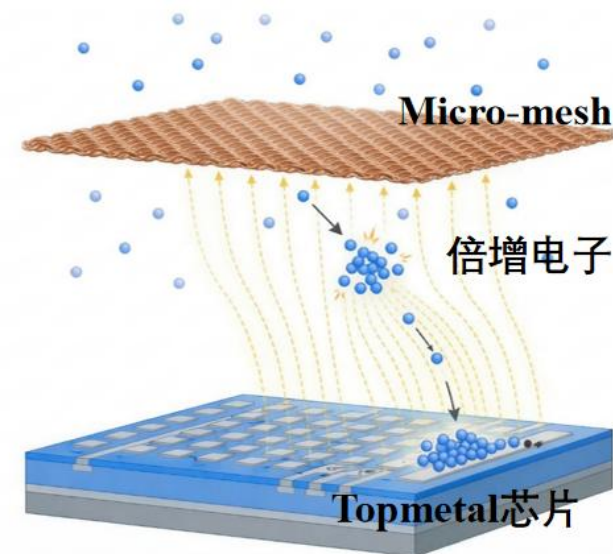
研究二：MPGD倍增-Topmetal读出

- 采用双层GEM 倍增结构与Topmetal-L芯片进行测试
- 在 ^{55}Fe 放射源照射条件下，气体电离产生的电子经过GEM倍增后可在芯片表面形成清晰的电荷分布，验证了Topmetal-L芯片对气体倍增电子信号的有效读出能力



下一步工作计划

- 开展Topmetal 与 Micromegas级联测试研究
- 计划采用微网结构与芯片分离制备的集成方案:
- Micromegas独立研发 → 利用精密工装实现与Topmetal集成
- 利用模块化拼接方案实现大面积拓展
- 开展高粒度dN/dx研究
- 激光长径迹重建研究



紫外激光指向稳定性验证

小结

- 建立了Topmetal气体径迹探测器的无倍增直接读出和MPGD倍增读出两条研究路线;
- 实现了5.49 MeV α 粒子电离电荷的直接二维成像, 测得径迹横向宽度 $\sigma \sim 147.3 \mu\text{m}$
- 与理论计算和Garfield++模拟处于一致的特征尺度;
- 完成双层GEM与Topmetal-L联合读出测试, 验证了芯片对气体倍增电子信号的有效像素化读出能力。
- 工作计划:
- 优化GEM/Micromegas—Topmetal-L的增益、阈值、空间分辨率和运行稳定性;
- 发展低功耗、多芯片拼接的大面积气体像素读出模块;
- 开展激光径迹、 dN/dx 簇团计数研究。



THANKS