

CPRE12—64SiPM: 应用于二维平面中子探测器的64通道SiPM读出芯片

王科, 王娜, 廖浩龙, 钱森, 赵朝阳, 罗莆萱, 陈昊, 韩纪锋, 任晶, 胡鹏等

中国科学院高能物理研究所, 四川大学

哈尔滨工程大学, 中核(北京)核仪器有限责任公司

国家重点研发计划资助, 项目编号2023YFF0721700

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会

2026.8.11 河南登封

核电子学读出芯片

功能

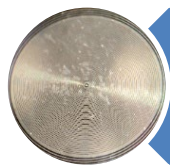
能量测量

计数测量

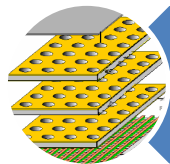
时间测量

适配

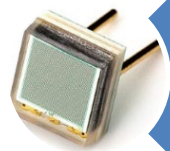
结构



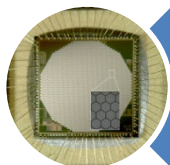
半导体探测器 (无增益)



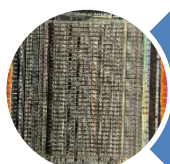
气体探测器



闪烁体探测器



面阵型



线阵型



单通道, 功能模块

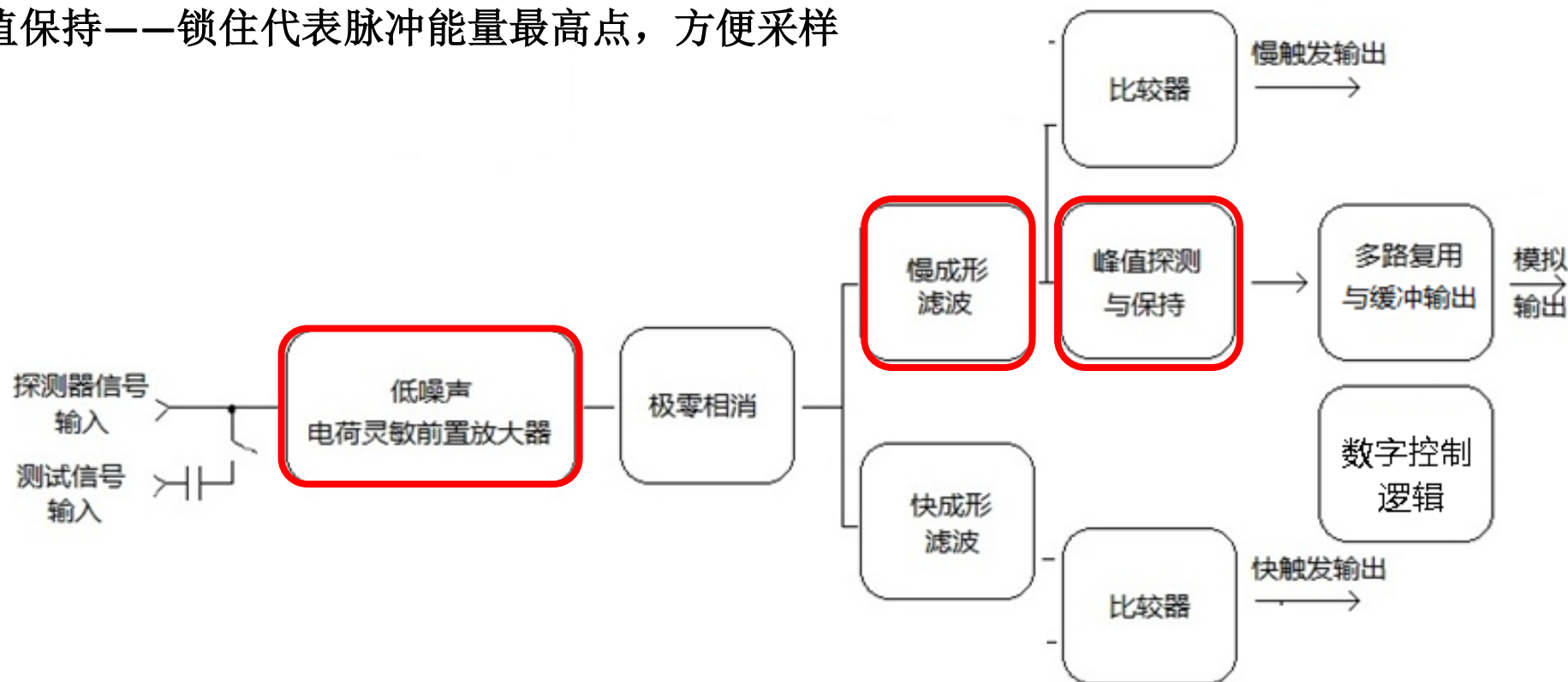
测能量型芯片单通道基本结构 电荷灵敏前放+滤波成形+峰值保持

电荷灵敏前放——电荷→电压转换+低噪声放大；

滤波成形——滤除高频、低频干扰噪声，剔除毛刺

把前放的指数衰减脉冲，修整为准高斯脉冲；

峰值保持——锁住代表脉冲能量最高点，方便采样



此次会议相关报告

40. CPRE12-64CZT: 用于3D-CZT的64通道低噪声读出芯片

浩龙 廖 (高能所)

针对半导体探测器（无增益），核心架构

电子学 张贴报告

介绍了一款专为三维位置灵敏碲锌镉（CZT）探测器设计的低噪声专用读出芯片。该芯片能够读取阴极和阳极信号，从而能够适配像素化和虚拟弗里斯格栅型 CZT 探测器，以及 Si-PIN 探测器。为像素型探测器的大平面阴极设计了阴极专用通道。每个通道集成了低噪声电荷灵敏放大器（CSA）、零极相消（PZC）电路、滤波成形电路，用于能量测量的峰值检测。

29. CPRE12-64SiPM: 应用于二维平面中子探测器的64通道SiPM读出芯片

科 王 (中国科学院高能物...)

针对闪烁体探测器（大增益）

2026/8/11 下午2:00

电子学 口头报告 Parallel 2 - session 3 (el...)

中子探测在物质科学、生命科学、国家安全及核医学等领域发挥着至关重要的作用，特别是针对高性能中子成像需求，基于锂玻璃闪烁体与 SiPM 阵列的二维平面探测器因高效率 and 快响应而备受关注。多通道大规模读出系统在集成度、噪声控制及

17. 面向 eXTP / PFA X 射线偏振仪的自触发事件驱动型读出 ASIC

娜 王 (IHEP)

针对气体探测器（中增益）

电子学 张贴报告

拟规划建设增强型 X 射线时变与偏振天文台（eXTP）所搭载的偏振聚焦阵列（PFA）由三台完全相同的 X 射线成像望远镜组成，可在 2-8 keV 能段开展 X 射线偏振观测，并具备优异的空间、能谱及时间分辨能力。

为实现上述科学目标，每个探测单元均采用辐射传感器与专用集成电路（ASIC）读出芯片相结合的方案，用于对单个 X 射

126. eXTP 卫星上的可成像 X 射线偏振探测器

教授 维春 姜 (中国科学院高能物...)

气体探测器（GEM）

2026/8/11 上午11:25

探测器 口头报告 Parallel 1 - session 2 (de...)

增强型 X 射线时变与偏振探测（enhanced X-ray Timing and Polarimetry，简称 eXTP）空间天文台是我国下一代旗舰级 X 射线天文卫星。eXTP 上的偏振测量 X 射线聚焦望远镜阵列（Polarimetry Focusing Array，简称 PFA）采用气体像素探测器（GPD）和 Wolter I 型聚焦镜，对 2-8 keV 的 X 射线进行偏振、成像、能谱和时变测量。其偏振灵敏度（MDP@2-8 keV）优于

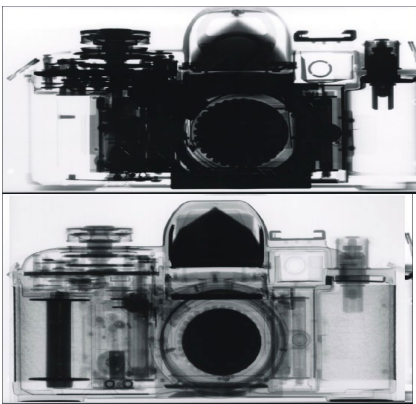
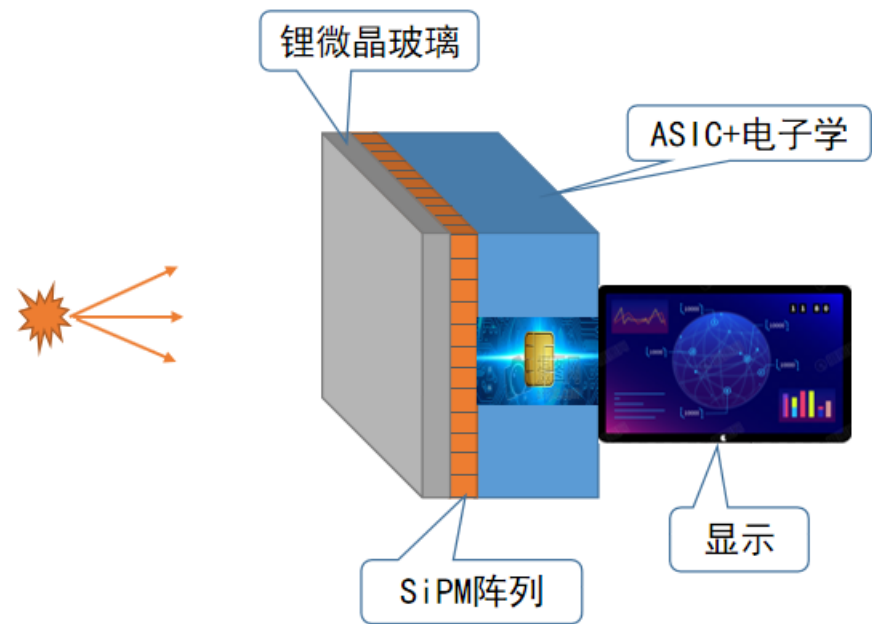


CPRE



二维平面中子探测器 闪烁体+SiPM（硅光电倍增管）+多通道能量读出芯片

国家重点研发计划，项目编号2023YFF0721700

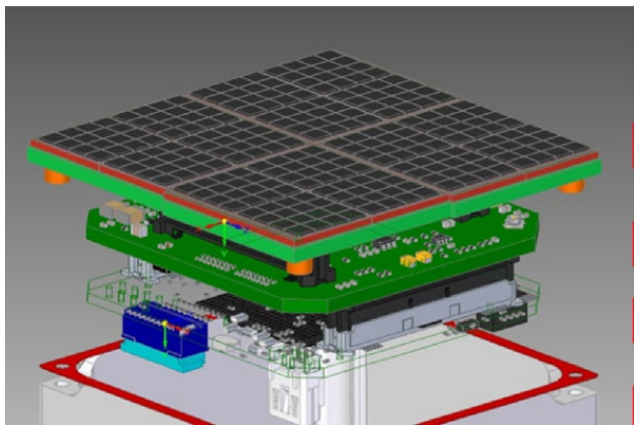


Xray成像和中子成像



佛像中子成像：轻元素敏感

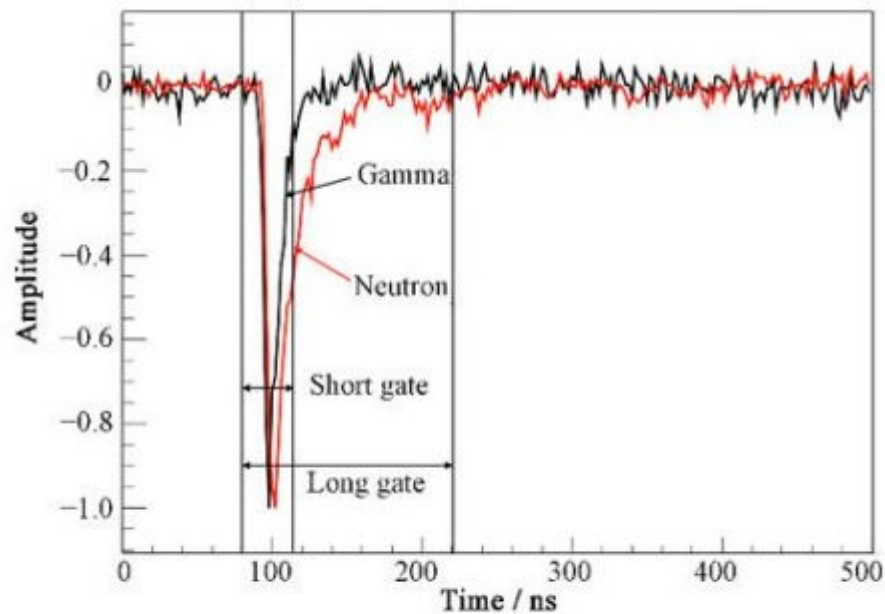
示意图



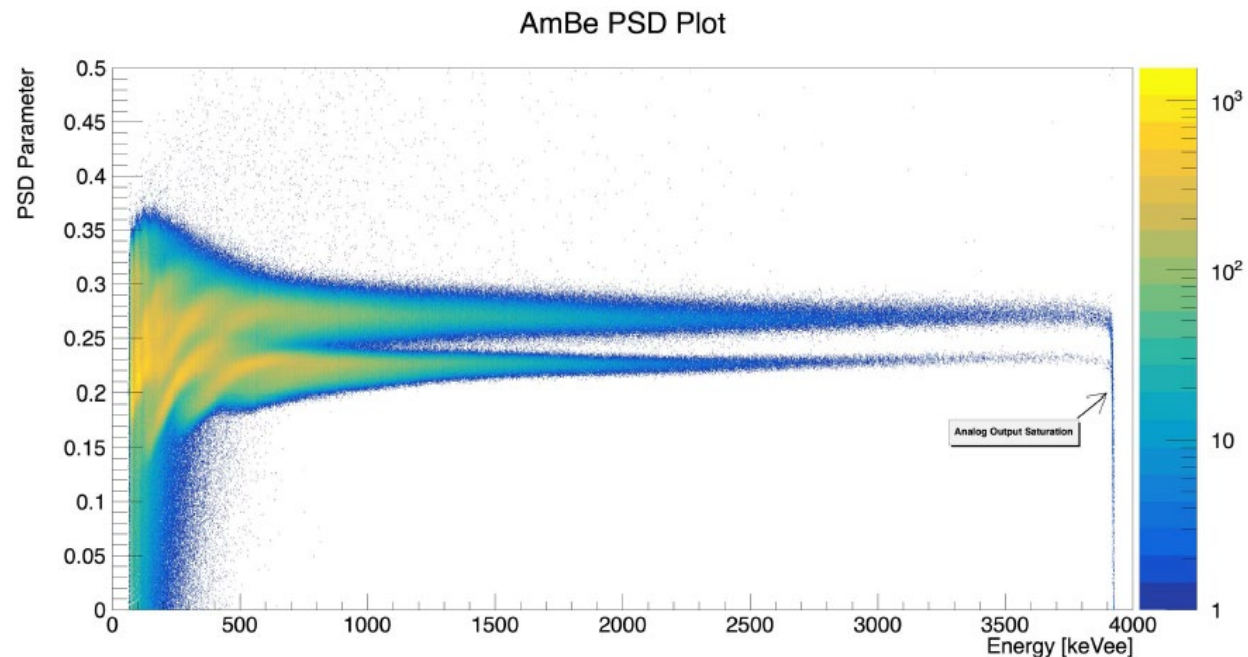
中子探测在物质科学、生命科学、国家安全及核医学等领域发挥着至关重要的作用,特别是针对高性能中子成像需求,基于锂玻璃闪烁体与SiPM阵列的二维平面探测器因高效率和快响应而备受关注。

中子与 γ 本底甄别主流方法

1. 脉冲形状甄别 PSD (Pulse Shape Discrimination)



测量得到的中子与伽马的波形
图，甄别原理图



2. 脉冲幅度甄别 / 能量窗甄别 (Energy Window) 锂玻璃中波形无区别，用此种

3. 飞行时间法 TOF (Time-of-Flight) 仅适合脉冲中子源 (加速器、脉冲反应堆)

常见闪烁体特性 (由claude生成并人工修正)

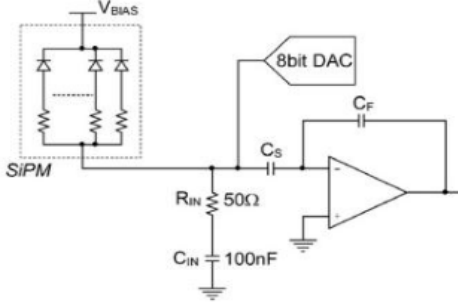
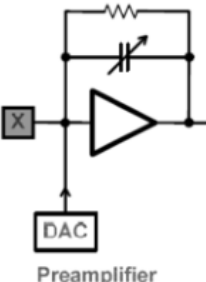
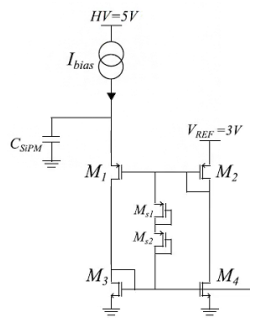
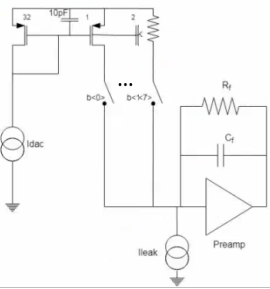
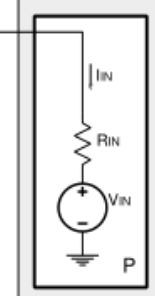
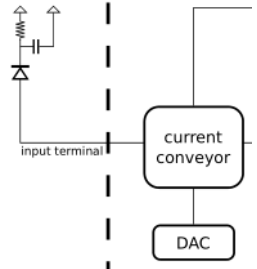
分辨 & 光输出			探测效率 (3 mm厚, 相对)			物性			
材料	能量分辨率 @ 662 keV (%)	相对光输出 NaI=100%		γ 效率 662 keV	热中子效率 25 meV	衰减时间 (ns)	密度 g/cm³	潮解性	主要用途
无机晶体闪烁体									
SrI ₂ (Eu) 碘化铯	2.5-3.0	120	中		低	1200	4.59	易潮解	核医学、 安防
LaBr ₃ (Ce) 溴化镧	2.6-3.0	165	中		低	16	5.29	易潮解	γ谱学、 PET
CeBr ₃ 溴化铈	3.5-4.0	170	中		低	17	5.18	易潮解	γ谱学 (低 本底)
GAGG(Ce) 石榴石铝钆	4.5-6	50 110	中高		低	90	6.63	不潮解	医学、安 防、空间
CsI(Tl) 碘化铯(铊)	5-7	85 140	中高		低	1000	4.51	轻微潮解	医学成 像、空间
NaI(Tl) 碘化钠	6-8	100	中		低	250	3.67	易潮解	γ谱学基准
CsI(Na) 碘化铯(钠)	7-8	85	中高		低	630	4.51	易潮解	医学、高 计数率
LYSO(Ce) 硅酸钪镨	7-10	75	高		低	41	7.10	不潮解	PET、高 计数率
GSO(Ce) 硅酸钆	9-10	25	中高		低	56	6.71	不潮解	PET、测 井
BGO 锗酸铋	9-12	15	极高		低	300	7.13	不潮解	PET、高 能物理

材料	分辨 & 光输出		探测效率 (3 mm厚, 相对)			物性		
	能量分辨率 @ 662 keV (%)	相对光输出 NaI=100%	γ 效率 662 keV	热中子效率 25 meV	衰减时间 (ns)	密度 g/cm³	潮解性	主要用途
有机固体闪烁体								
BC-408 / EJ-200 塑料闪烁体	—	65	极低	极低	2.1	1.03	不潮解	时间测量、n/γ甄别
p-Terphenyl 有机晶体	—	40	极低	极低	3.5	1.23	不潮解	快时间、n/γ甄别
无机玻璃闪烁体								
GS20 锂玻璃 ⁶Li 硅酸盐玻璃	1MeV——1000个光子, 1keV-1个光子 — 光产额: BGO一半 7.5	—	极低	极高	75	2.50	不潮解	热中子探测、谱学
液体闪烁体								
LAB + PPO 线性烷基苯基液闪 (JUNO型)	~3 @ MeV (大体积)	60-80	低	低	3-5	0.86	不挥发潮解	中微子、β谱学
BC-517 / EJ-301 二甲苯基液闪 (n/γ 甄别型)	—	75-78	极低	低	2-3	0.87	可燃/挥发	快中子谱学、n/γ甄别
Gd-LS 掺钆液闪 (RENO/DayaBay 型)	~5-8	50-70	低	极高	3-5	0.86	不潮解	反应堆中微子、热中子

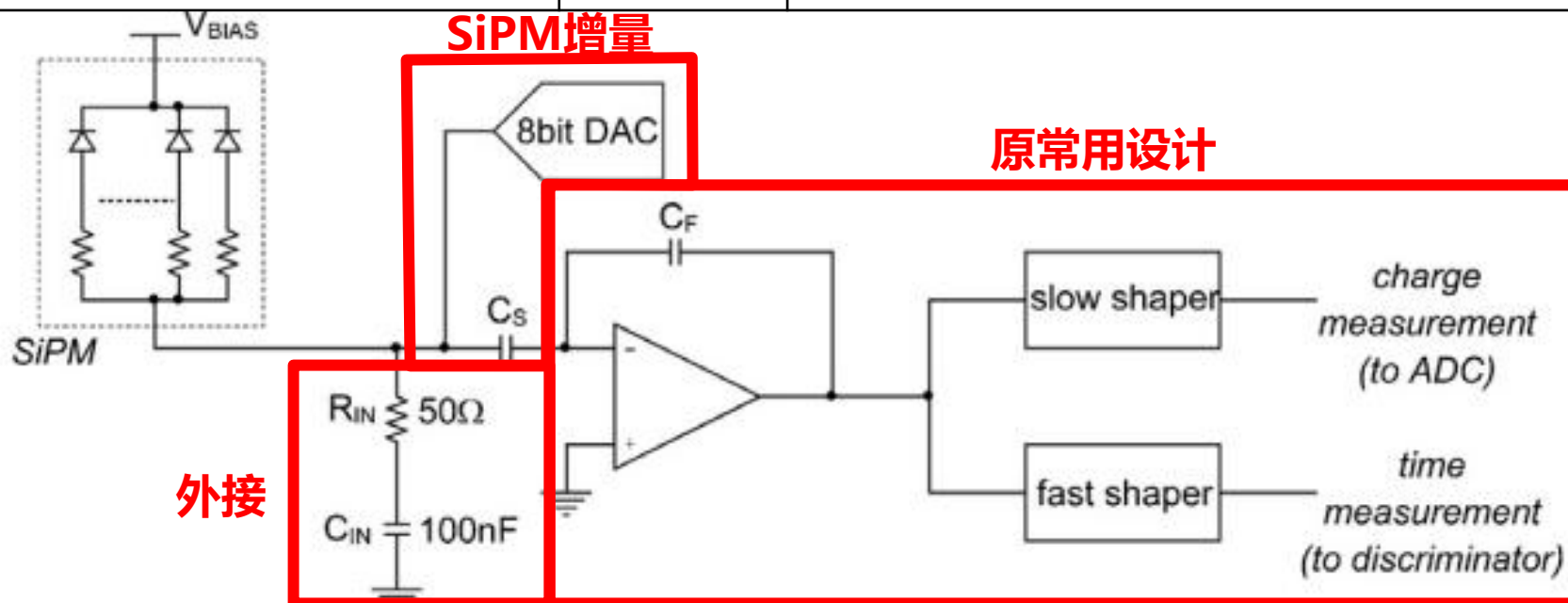
γ 探测效率 (蓝色条): 基于 662 keV 线性衰减系数估算, 3 mm 厚度, 以 BGO 为最高基准归一化。液体闪烁体密度低、Z 小, 3 mm 内效率极低, 但实验中通常使用吨级乃至千吨级体积, 总探测效率可达接近 100%。

热中子效率 (绿色条): GS20 靠 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反应 ($\sigma=940\text{ b}$); Gd-LS 靠 ${}^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ 反应 ($\sigma\approx 254,000\text{ b}$), 热中子捕获截面极大, 少量 Gd 掺杂 (0.1% wt) 即可实现极高效率。

LAB+PPO 能量分辨率约 3% 系在 MeV 量级、大体积条件下统计平均, 不可与固体晶体在 662 keV 的值直接比较。EJ-301 具有优异 n/γ 脉冲形状甄别 (PSD) 能力, 是快中子测量首选液闪。

知名芯片	SPIROC2b	CITIROC (停产)	Radioroc2 (动态范围低, 速度快)	VATA64 HDR	GAMMA	KLauS	TOFPET2	HGCROC3
工艺节点	0.35	0.35	0.13	0.35	0.35	0.18	0.11	0.13
输入端简图								
处理模式	电压型			电荷型	电流型			

CITIROC
SPIROC2b
Radioroc2
(电压型, 后端与常用结构兼容)



SiPM各通道增益具有较大不一致性，多通道时需要调整

MPPC 模块各通道增益一致性

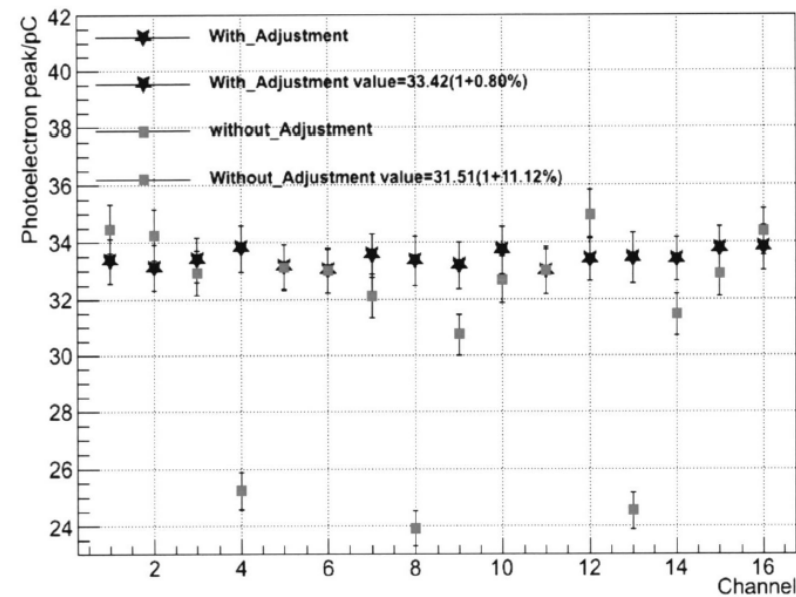


图 3-12 加入一致性调节前后，MPPC 模块 16 个通道增益一致性比较

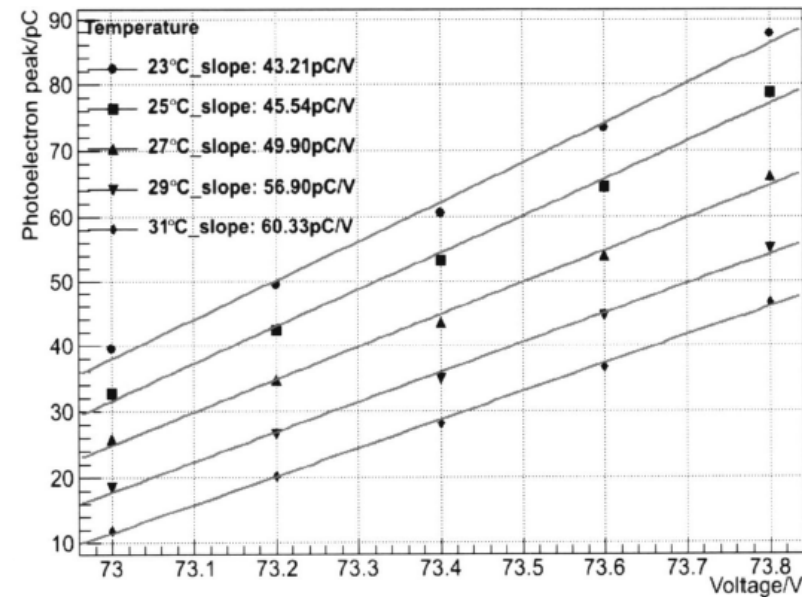


图 3-11 MPPC 模块相对增益随偏压变化关系

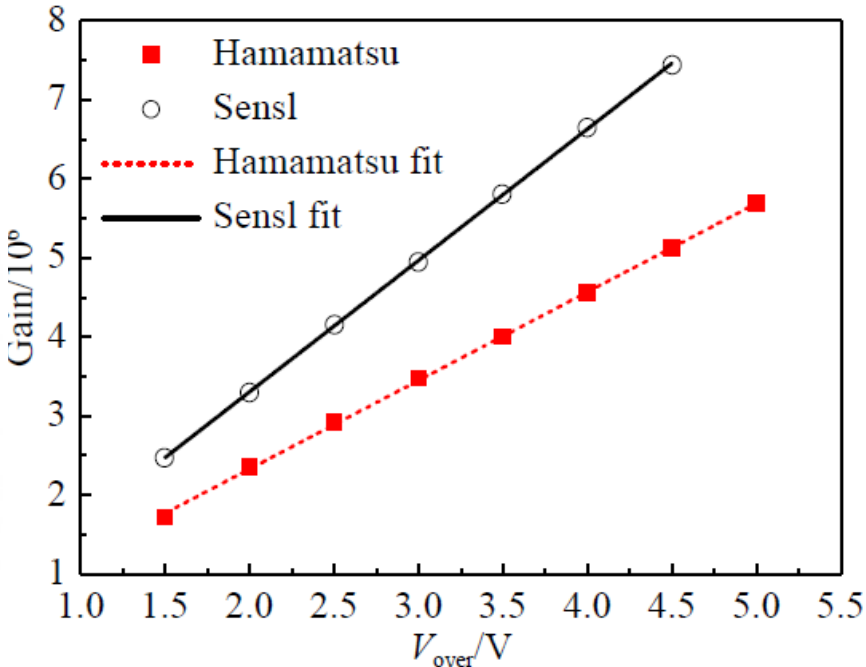


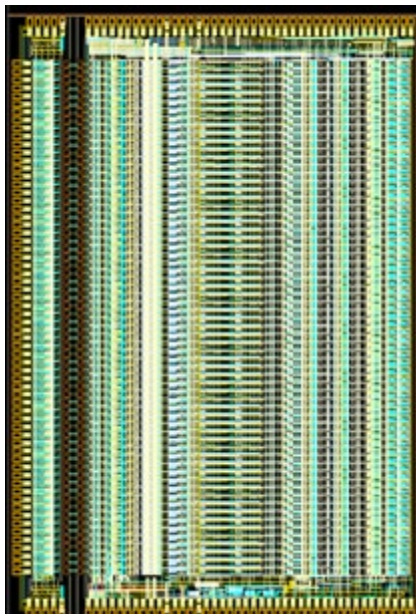
图 6 SiPM 增益-过偏压曲线(在线彩图)

增益一致性对模块用于二维位置分辨探测器电子学读出、重心法定位上有重要意义。

基于温度补偿的多通道MPPC增益稳定性及一致性研究 方灿

用于中子位置灵敏探测器的SiPM性能研究 黄畅 等

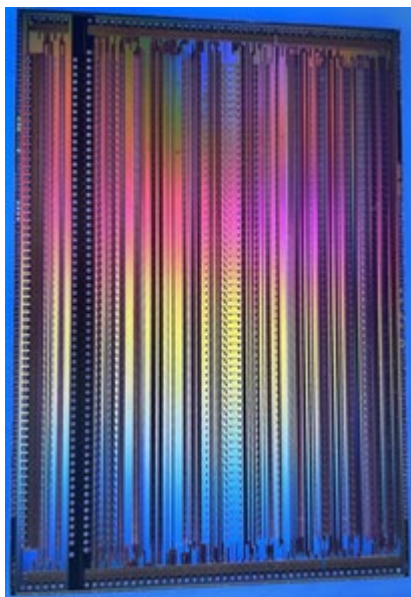
版图



采用CPRE64-CZT的架构,
前端加入DAC与增益调节电容形成CPRE64-SiPM芯片

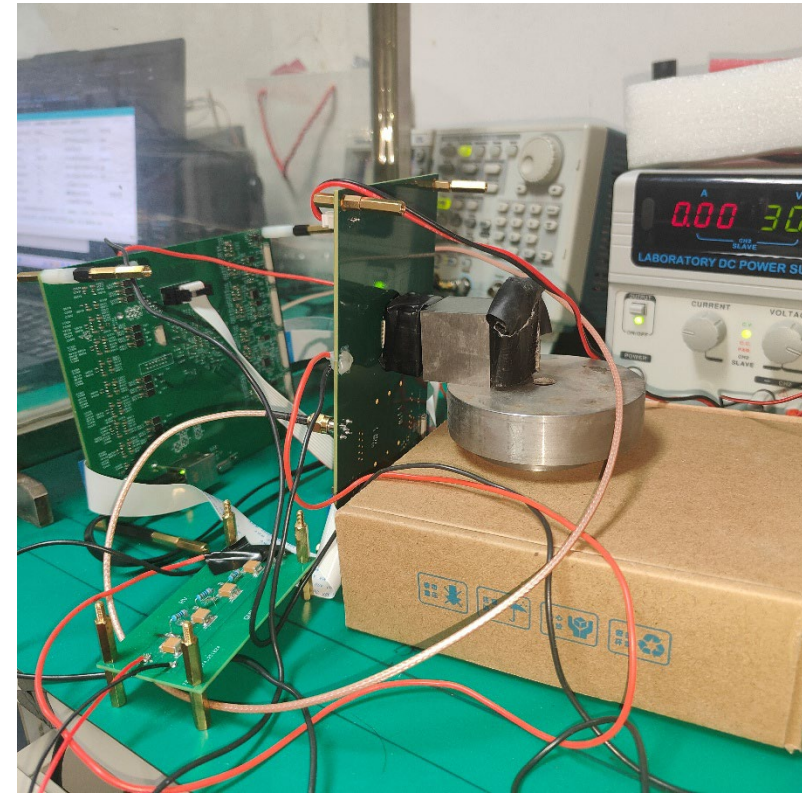
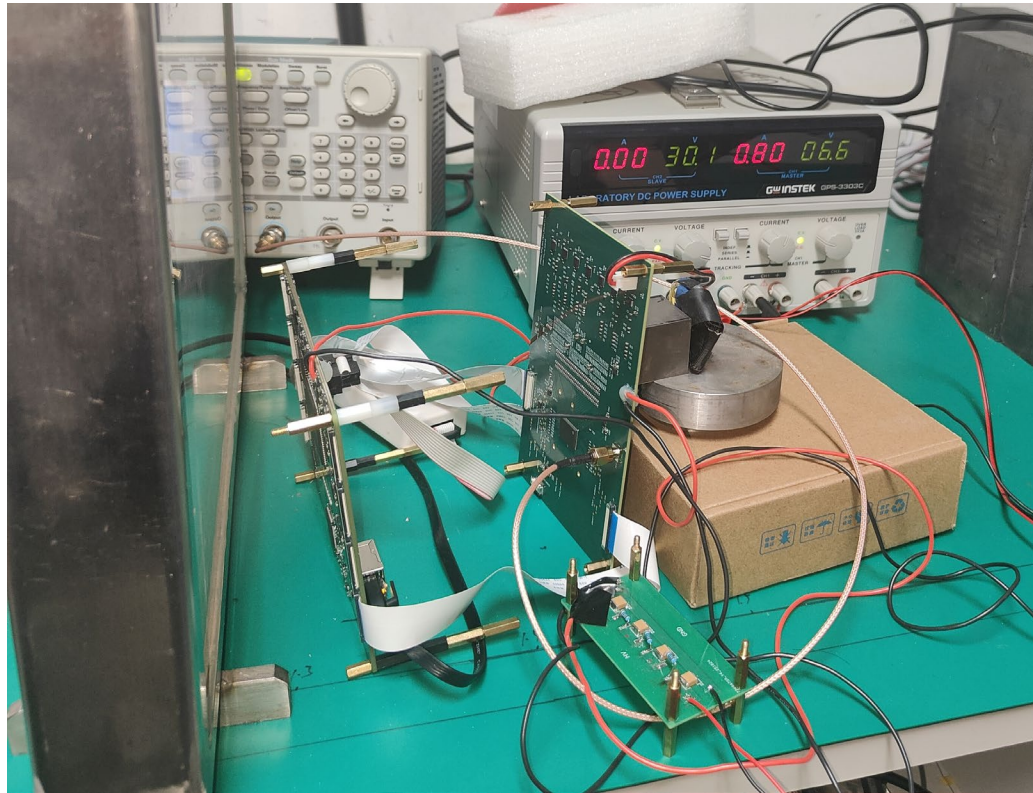
- 1) 通道数: 64通道
- 2) 输入噪声: 在中增益下 $<48\text{fC}@500\text{pF}$
(即 300k e , 单光子为 160fC (10^6 e)
在高增益下 $<16\text{fC}@500\text{pF}$
(即 100k e , 比单光子小10倍) ,
- 3) 放大倍数多档可调 ($3*3*4=36$ 档) , 单增益通道
- 4) 输入端电压可调 (5V/256档)
- 5) 成形时间可调
- 6) 动态范围 > 70 , 最大 1nC 。
- 7) 功耗: $\sim 5\text{mW}/\text{通道}$ 。
- 8) 输入端电压可调 (256档)

裸片





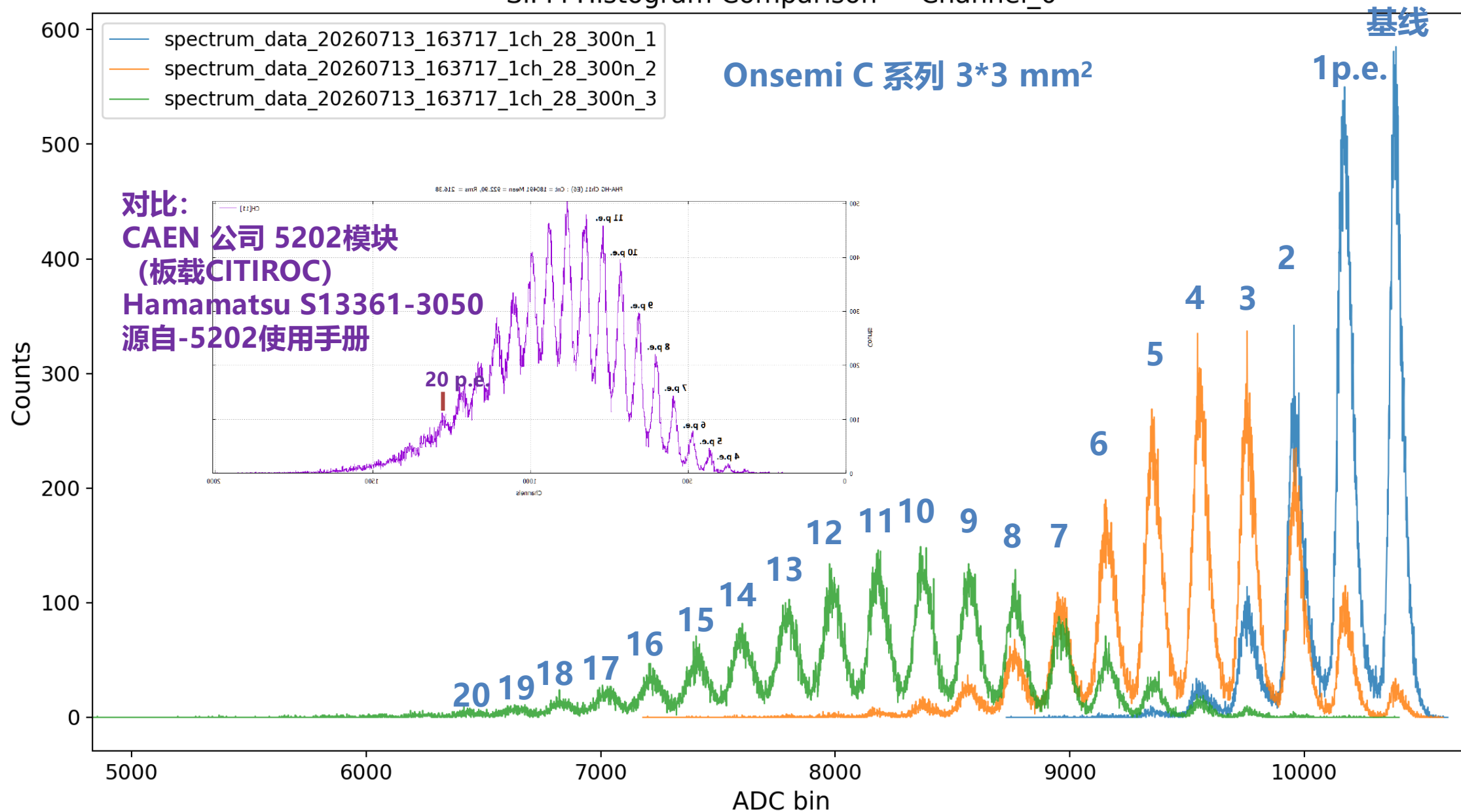
**BGA封装
(14mm*7mm)**



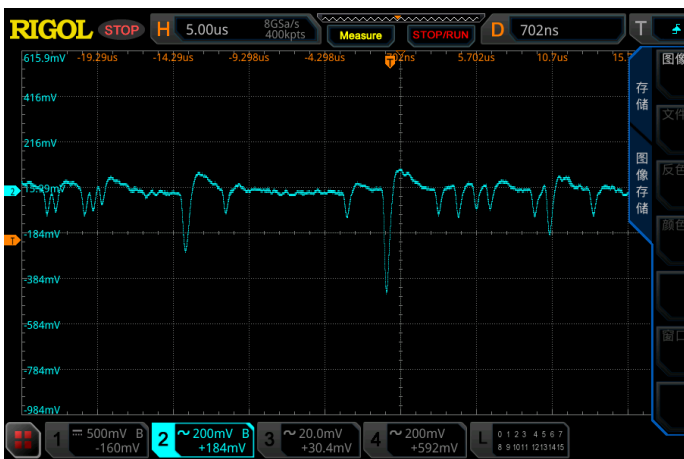
实验设置

LED灯激励单光子谱 (3种不同电压)

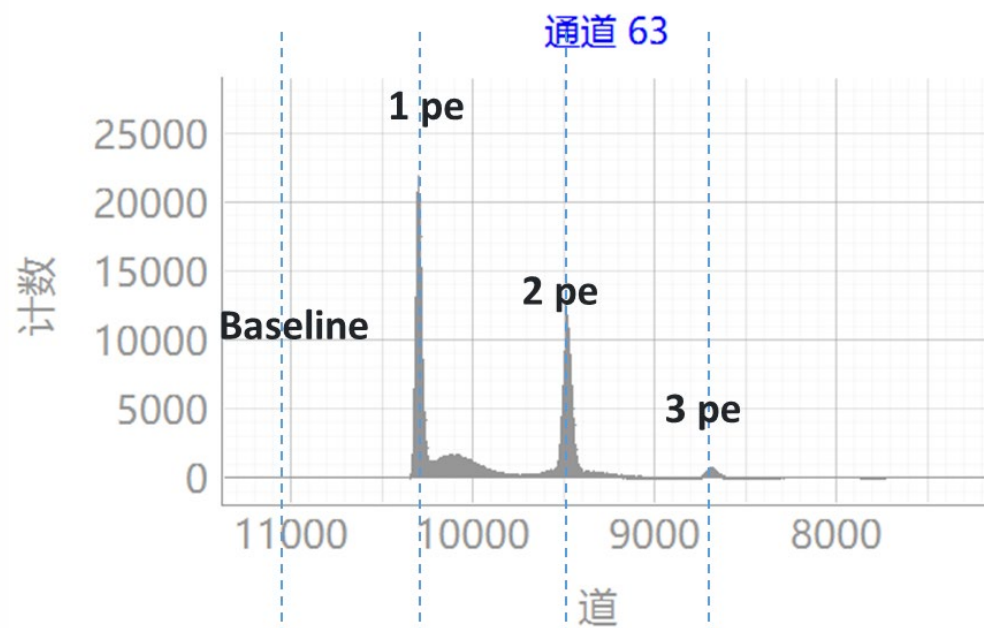
SiPM Histogram Comparison — Channel_0



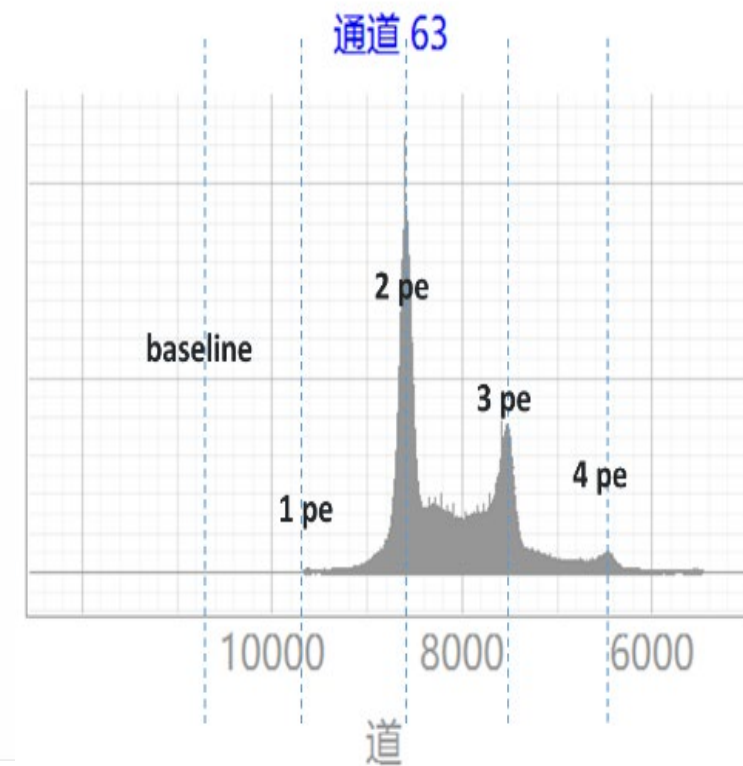
其它暗计数单光子谱



Onsemi J Series 暗计数波形

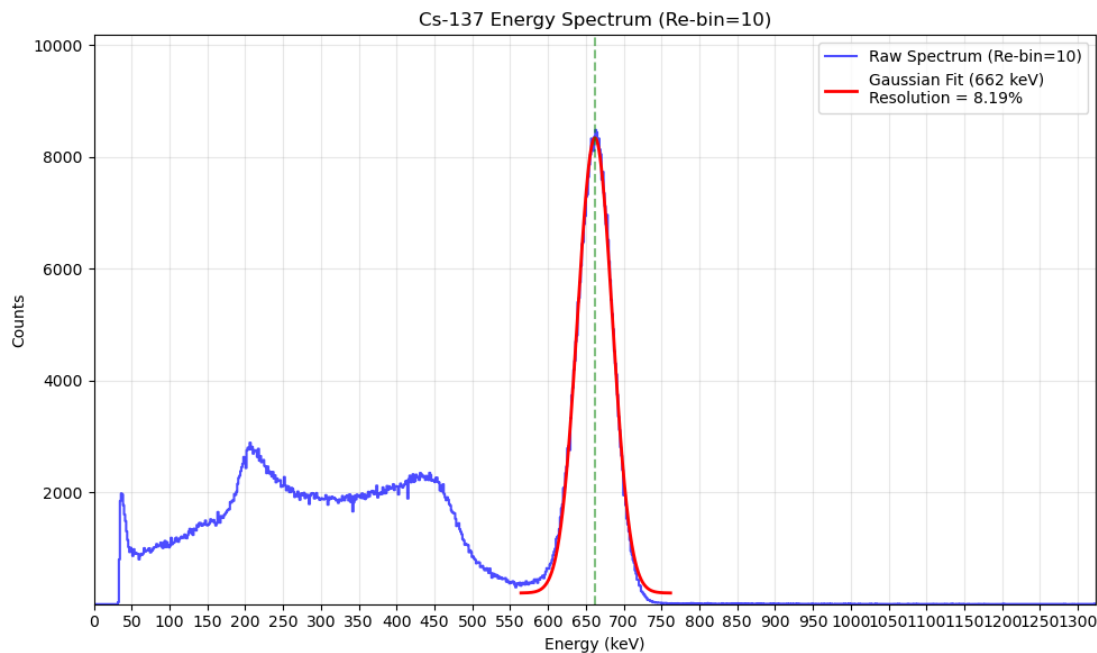


ONSEMI MICROFC-10035
(1mm²)

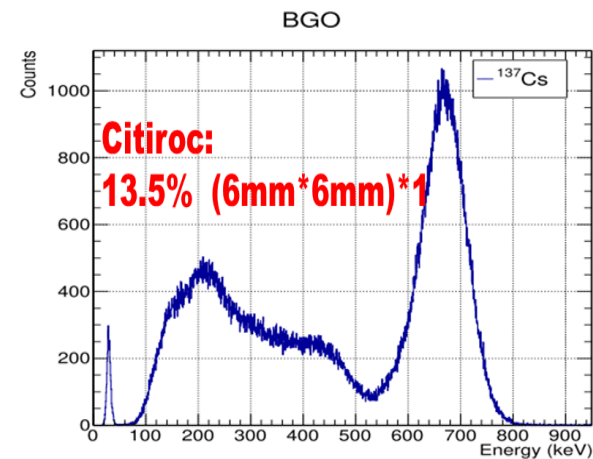


HAMAMATSU S13360-3050CS
(9mm²)

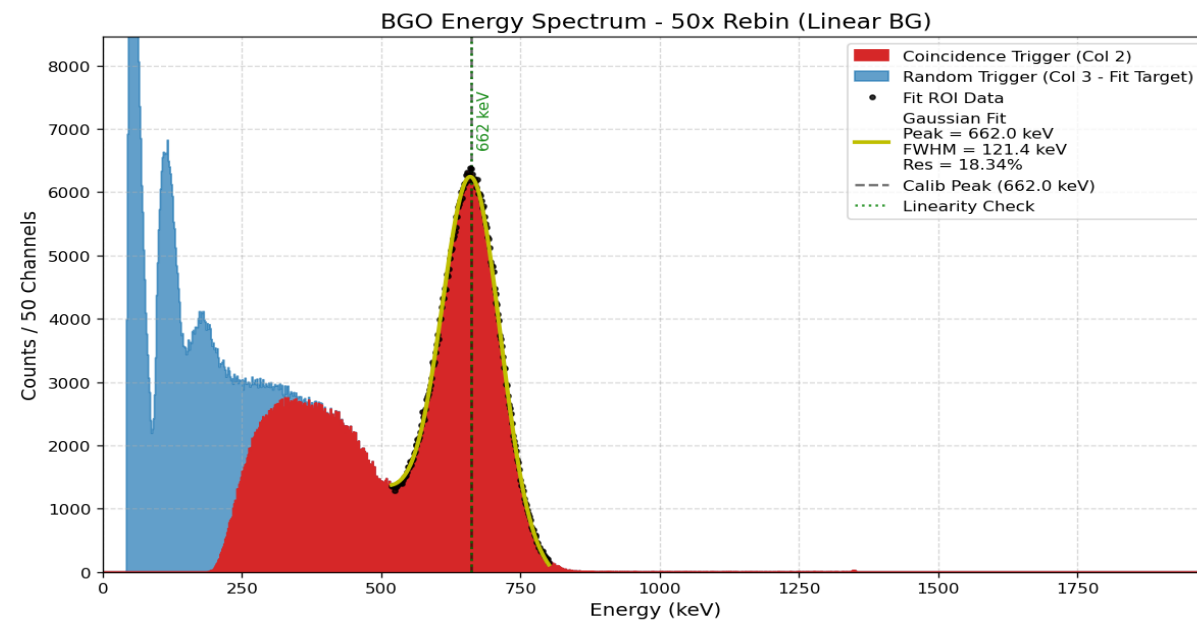
能谱测试 1



Cs137全能峰分辨率8.19%，单通道
NaI ($6 \times 6 \text{ mm}^2$)

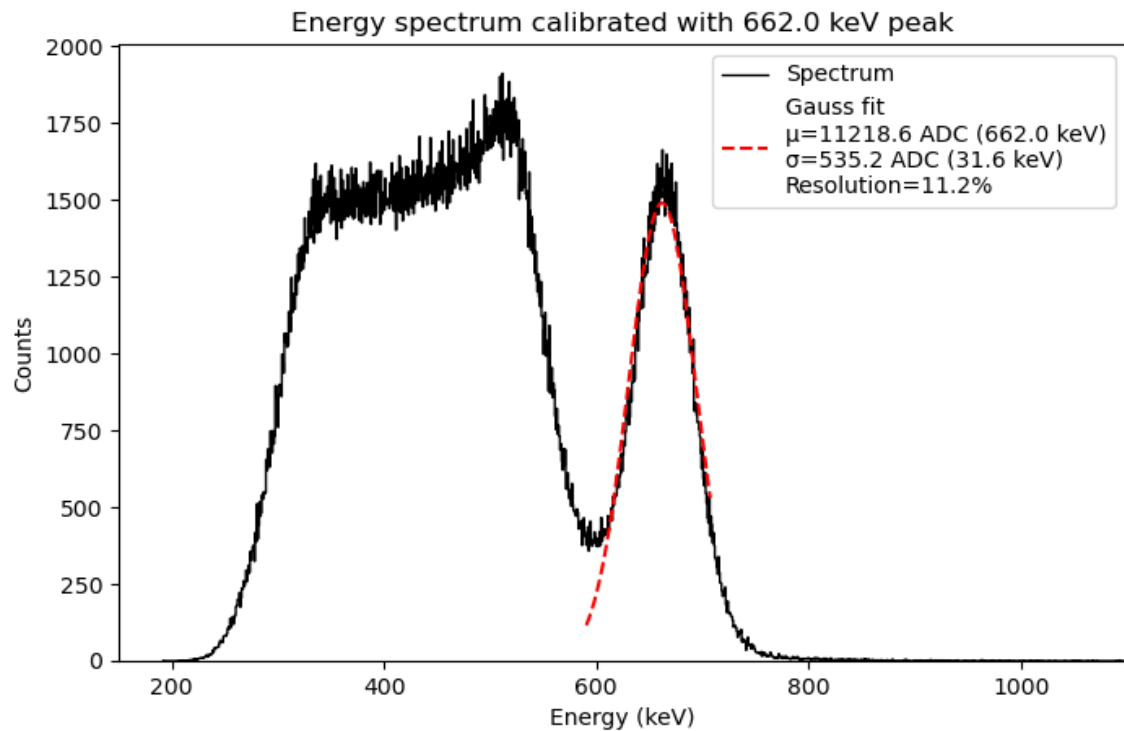


(BGO 单通道能谱)



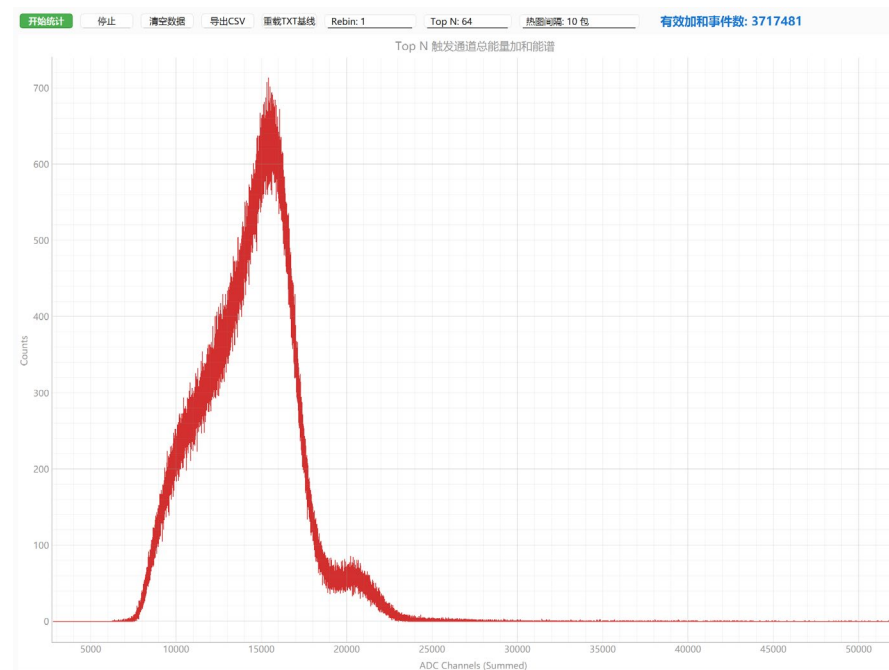
BGO ($3 \times 3 \text{ mm}^2$ /通道 4通道 加和能谱)
全能峰分辨率18.34%
(早期测试结果)

能谱测试 2



GAGG (薄 1mm 64通道
(每通道 $3 \times 3 \text{ mm}^2$))

Cs137全能峰分辨率11.2%，64通道加和



锂玻璃 64通道
(每通道 $3 \times 3 \text{ mm}^2$, 5mm厚)

Cs137全能峰可见，64通道加和

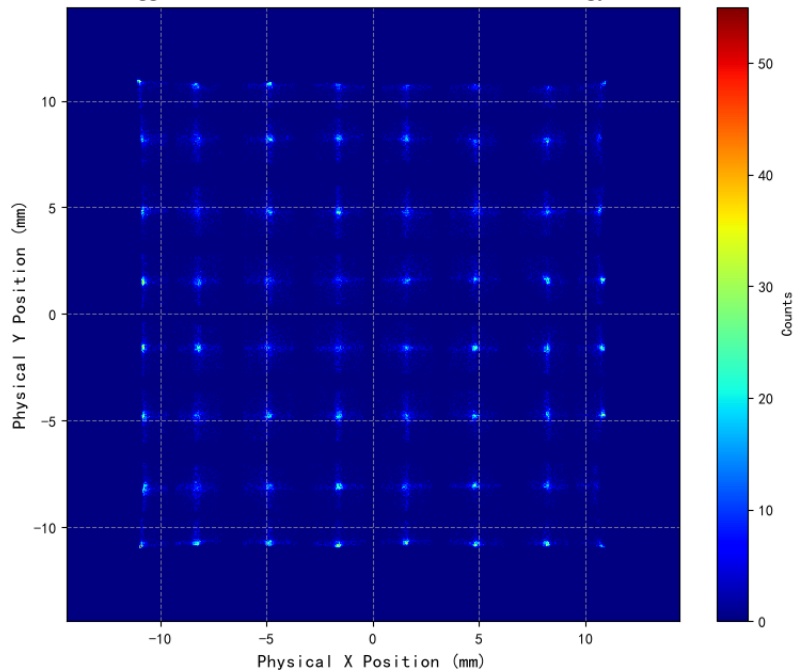
成像测试

GAGG (薄 1mm) Cs^{137} 伽马成像图

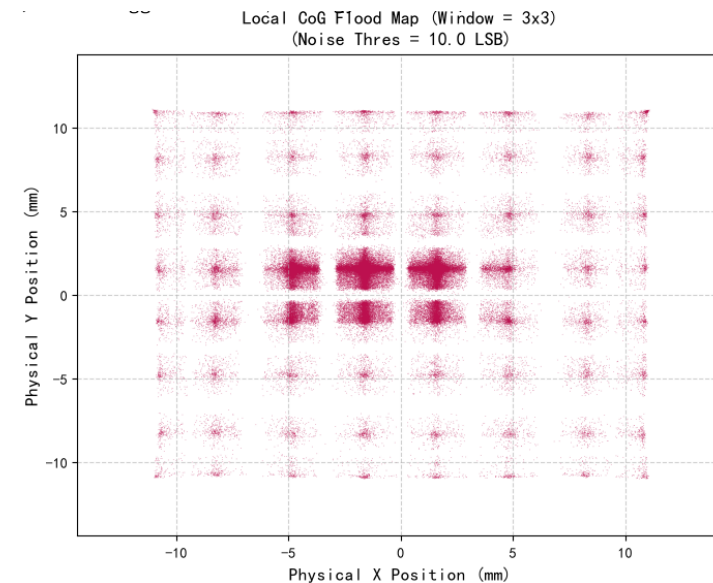


准直器 3*3mm

Local CoG Flood Map (2D Histogram), Window = 3x3
Valid Triggers: 79079, Noise Thres = 10.0 LSB, Energy > 6000.0

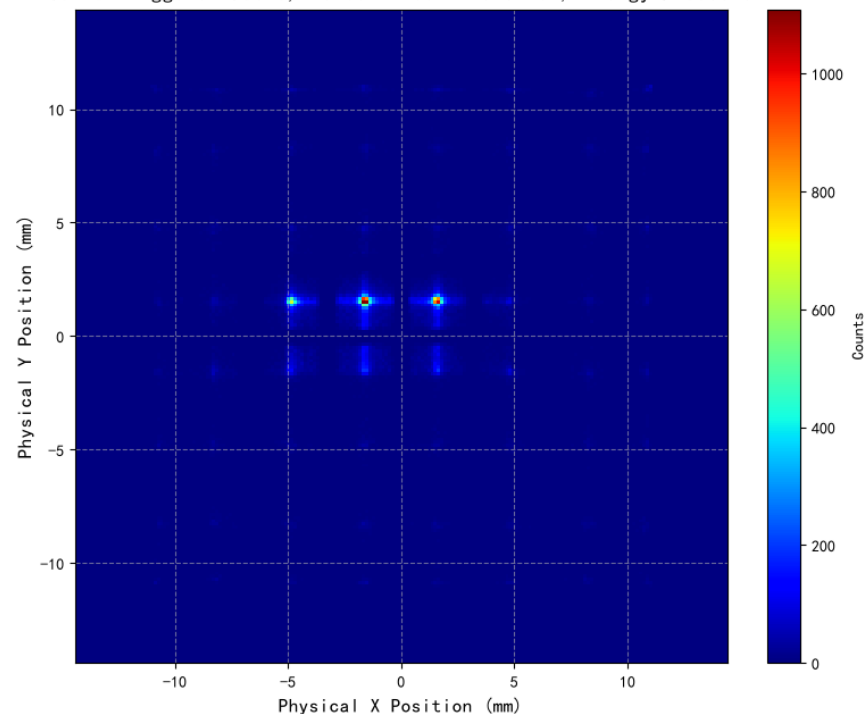


未准直时
散点热力图



准直后
散点图

Local CoG Flood Map (2D Histogram), Window = 3x3
Valid Triggers: 95848, Noise Thres = 10.0 LSB, Energy > 5500.0



准直后
热力图

后续计划

- 1. 完善中子测试
- 2. 进一步加深SiPM能量读出领域研究。
- 在已有经验基础上，设计专用SiPM读出芯片，拥有更大动态范围及更灵活的读出模式，2027年回片。

谢谢！