

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

基于像素型碲锌镉探测器的高功率质子束斑成像系统研究

秦阳辉, 周自衡, 王宇, 赵懋源, 封常青*, 刘树彬

中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室

湖北·恩施

2023.8.10



I. 研究背景

II. 成像系统介绍与测试结果

I. 探测器介绍

II. 基于分立器件读出电子学系统与测试结果

III. 基于ASIC读出电子学系统与测试结果

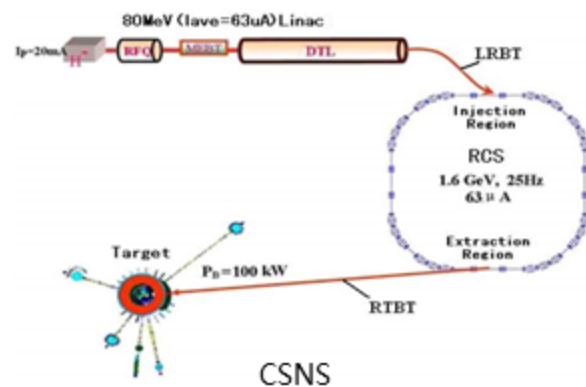
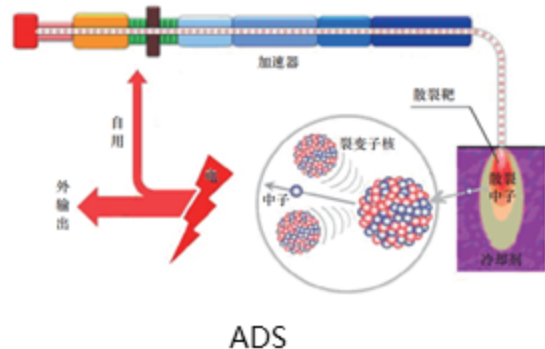
III. 总结

➤ 高能质子束打重金属靶发生散裂反应产生高通量、宽能段的脉冲中子束

➤ 应用场景

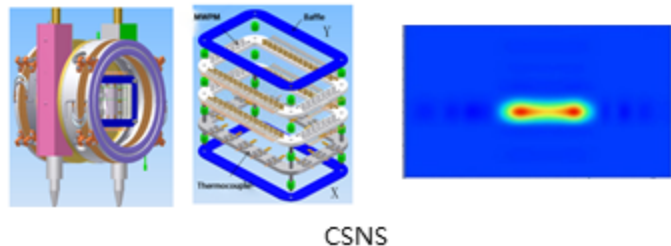
- 我国散裂中子源 (CSNS), 目前100kW, 未来功率将升级500kW
- 正在研究的加速器驱动次临界系统 (CiADS)

➤ 监测高功率质子束的功率密度分布对散裂靶站的稳定运行有着重要意义



➤ 多丝室 (MWPM) 直接测靶前质子束流强

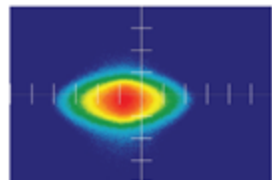
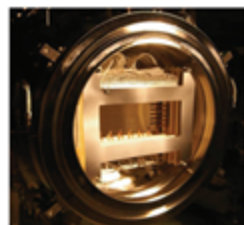
- CSNS^[1]、JSNS^[2]目前使用
- 只能分别测得质子束水平和垂直分布, 无法直接获得二维分布
- 功率升级后会直接测量损坏探测器



CSNS

➤ 将荧光材料喷涂到靶前表面, 通过摄像机监测^[3]^[4]

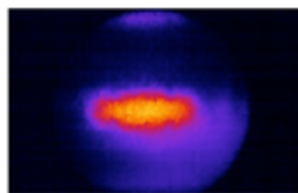
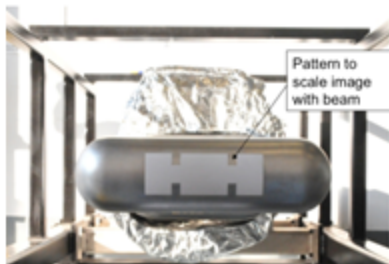
- 荧光材料: $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$
- 发光效率会恶化, 需延长累积时间, 背景光影响增大
- 相机不能距离靶太远, 需耐辐照



JSNS

➤ 活化分析恢复入射质子束光斑的分布

- 无法实时分析数据



[1] M. Meng et al, "The Installation and Application of Multi-wire Profile Monitor for PBW in CSNS," in IBIC2019, 2019, doi: 10.18429/JACoW-IBIC2019-TUPP025.

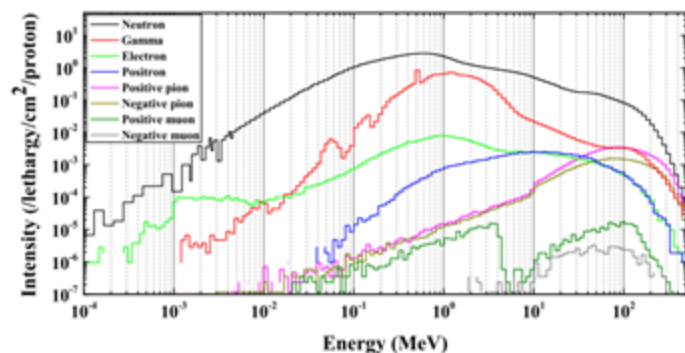
[2] S.-I. Meigo, M. Ooi, K. Ikezaki, A. Akutsu, S. Sakamoto, and M. Futakawa, "Development of profile monitor system for high intense Spallation Neutron Source," in IBIC2012, Tsukuba, Japan, 2012.

[3] T. Shea et al, "Installation and initial operation of an on-line target imaging system for SNS," in 19th meeting on International Collaboration of Advanced Neutron Sources (ICANS XIX), Grindelwald, Switzerland, 2010.

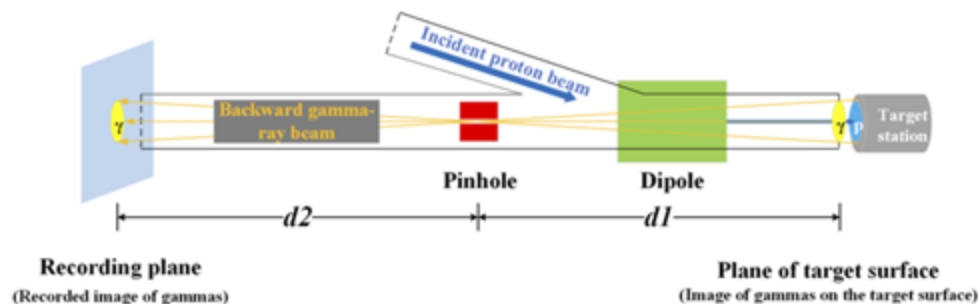
[4] Z. Zeng et al, "Design of imaging system for CSNS near-target beam diagnostics," Radiation Detection Technology and Methods, vol. 2, no. 2, 2018, doi: 10.1007/s41605-018-0067-x.

► 利用散裂反应次级粒子成像，间接测量质子束性质

- 散裂反应产生大量轻粒子，其中伽马射线和中子不受磁场影响，且流强高
- 探测器可以放置在远离靶站的低辐射区捕获小孔成像后伽马分布的倒像
- 利用探测系统以及图像重建算法实时监测质子束斑的分布



靶表面各种次级粒子的强度和能量关系^[1]



➤ **三维位置分辨探测器，对伽马射线探测效率高，能量分辨好**

特定能量全能峰筛选

筛选靶前出射的伽马射线

➤ **碲锌镉(CZT)半导体材料**

禁带较宽，室温工作

探测效率高

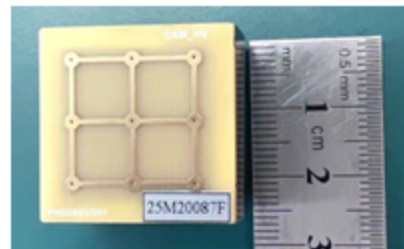
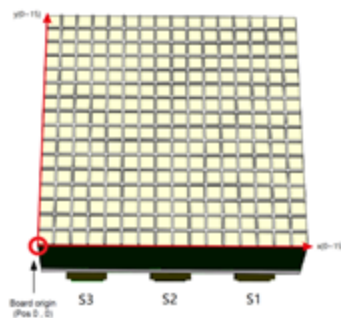
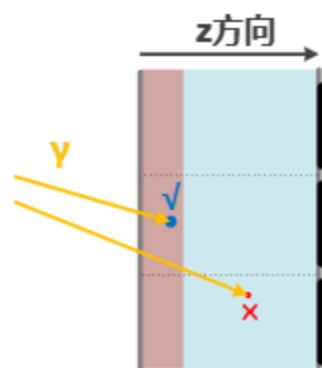
➤ **像素型碲锌镉探测器**

尺寸：25 mm * 25 mm * 10 mm （像素数16*16）

像素尺寸：1.5mm*1.5mm

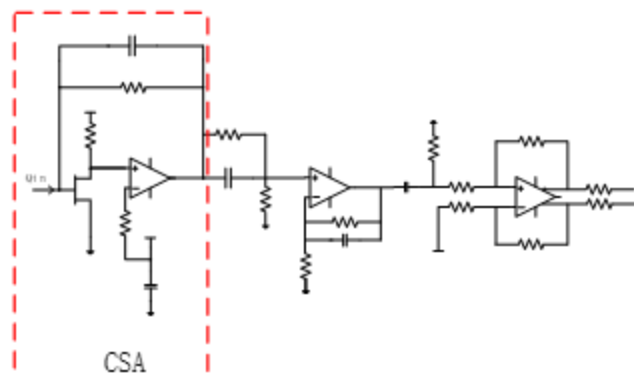
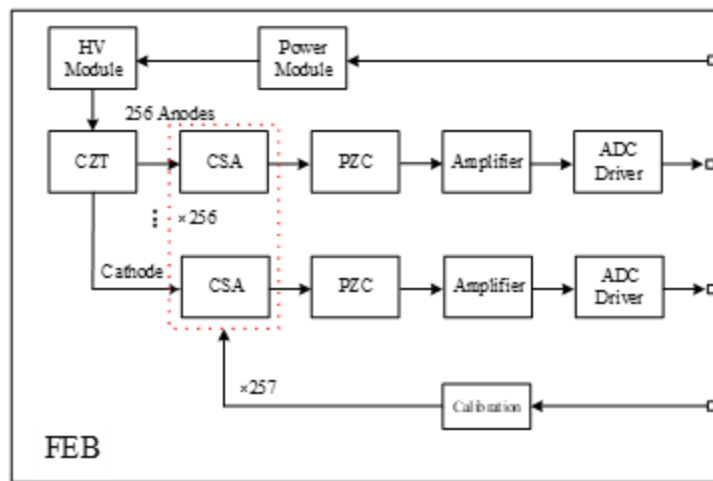
满足**像素面积小、能量分辨好**的要求

可以获取击中位置的**三维信息**



► 基于分立元件的前端电子学模块 (FEB)

- 257路独立通道
- JFET低噪声电荷灵敏前放+极零相消+主放
- 差分驱动



前端电子学模块 (子母板)

➤ 波形数字化模块 (ADM)

- 64通道波形数字化
- 采样率40M、量化精度12bit
- 阳极触发、同时上传阴极数据

➤ 数据汇总模块 (DCM)

- 提供全局时钟源
- 光纤汇总4块ADM的数据
- 与服务器间采用千兆以太网链路



CZT读出电子学系统



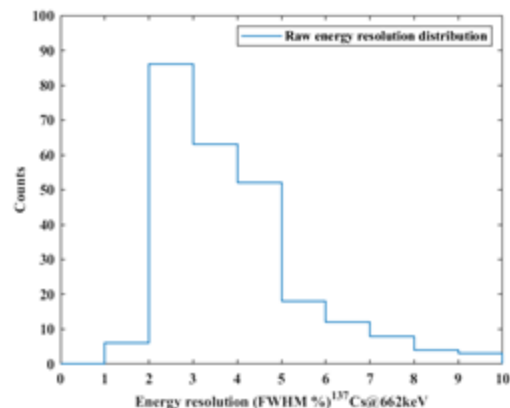
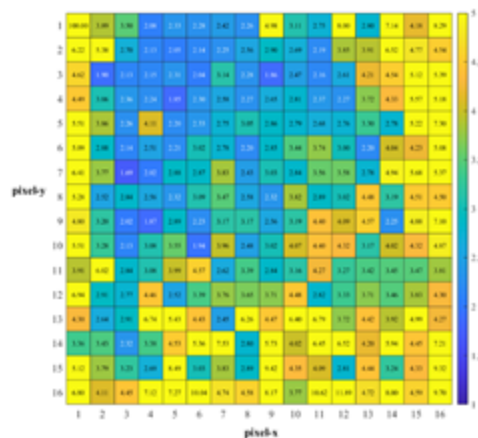
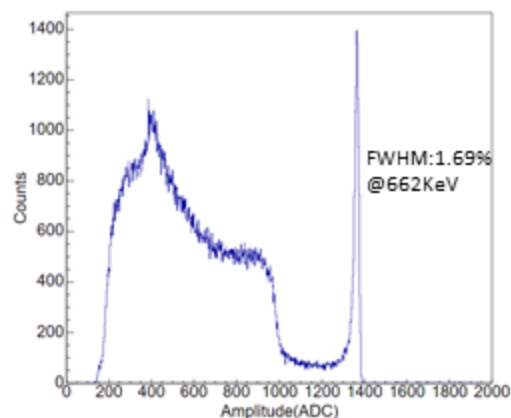
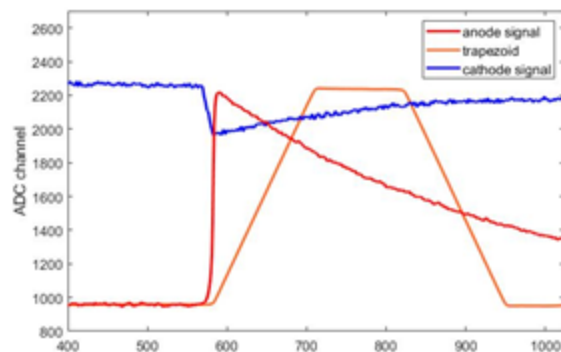
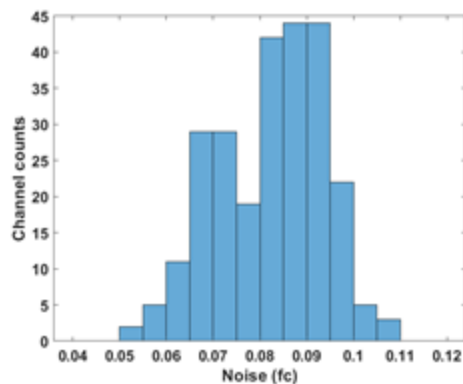
读出电子学系统框图

➤ 读出电子学噪声水平

- 阳极通道ENC < 0.11fc (688e)

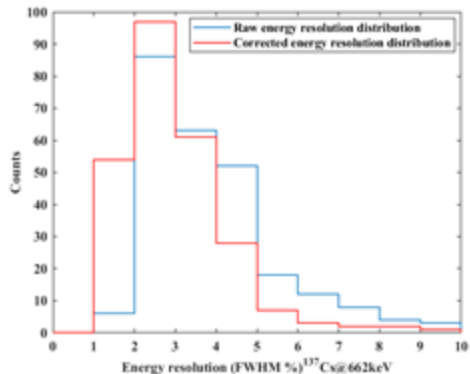
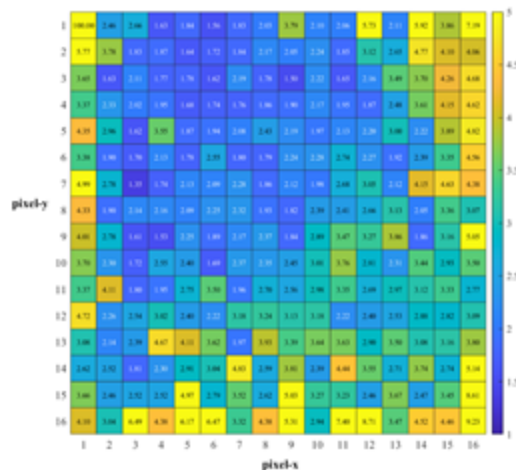
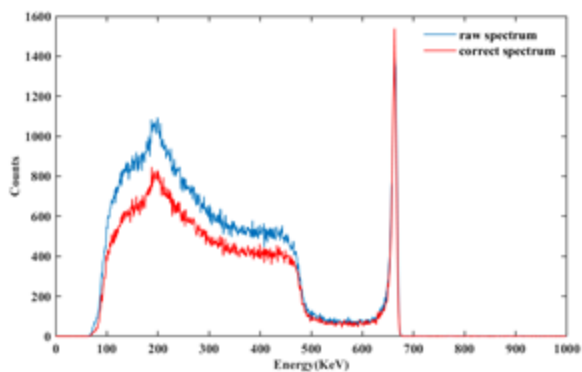
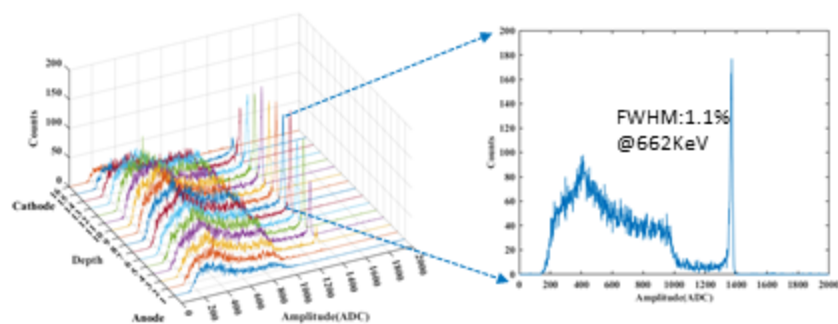
➤ 放射源测试

- ^{137}Cs 放射源
- 梯形成形计算幅度

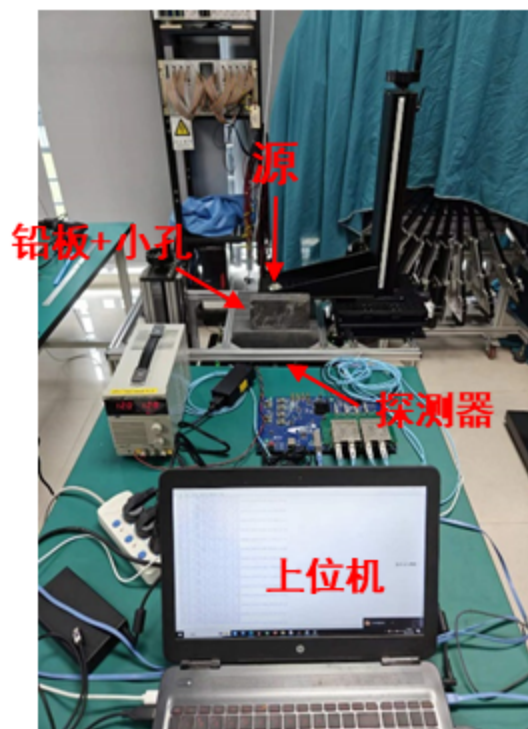
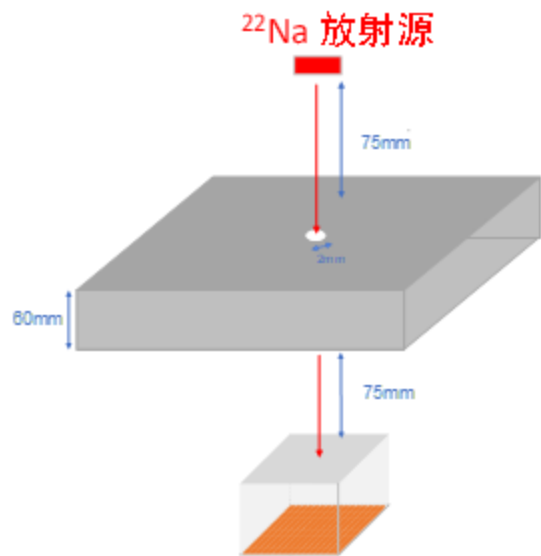


Energy resolution distribution (FWHM % ^{137}Cs @ 662keV)

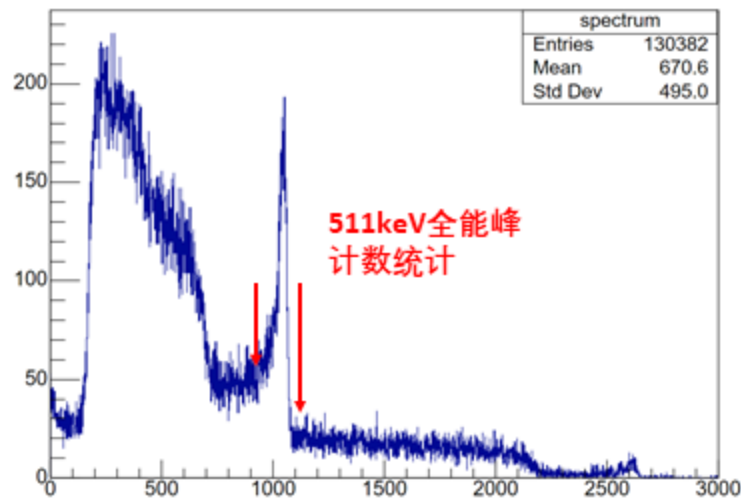
- 阴极和阳极幅度比/触发时间差计算击中深度
- 将同一像素根据不同深度对能谱分组
- 将深度筛选后的能谱归一叠加
- 最优像素能量分辨：1.69%到1.35%



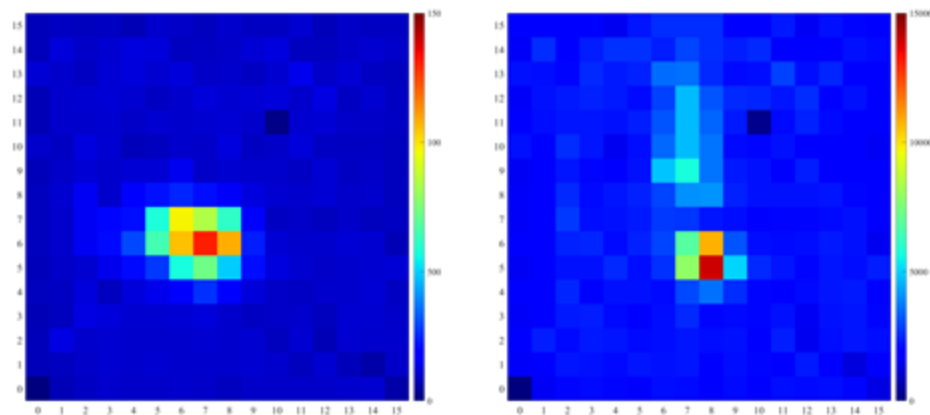
- 单 ^{22}Na 源通过小孔成像
- 双 ^{22}Na 源通过小孔成像



➤ ^{22}Na 放射源小孔成像后能谱



➤ 单源和双源的位置信息



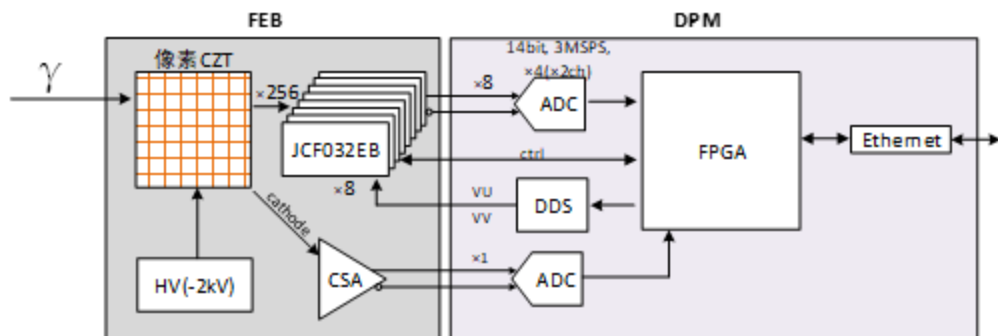
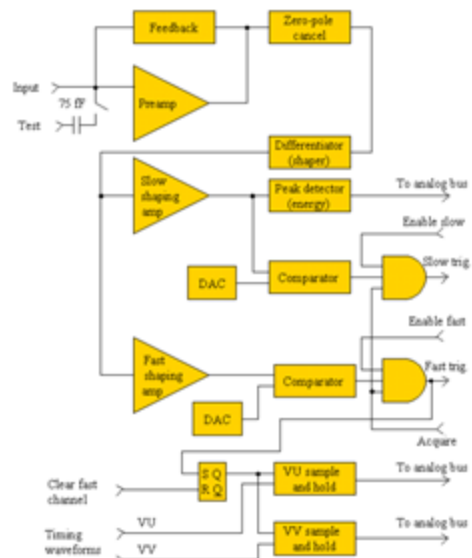
^{22}Na 单源小孔成像结果

^{22}Na 双源小孔成像结果

基于ASIC的读出电子学系统



芯片	通道数	量程	噪声
JCF032EB	32	6fC~200fC 可调	最小量程时 80e+12e/pF

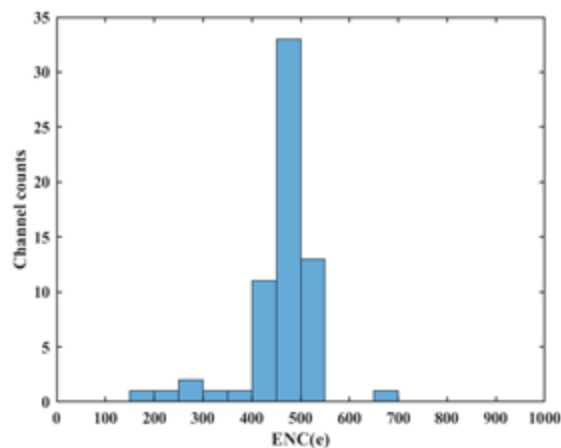


幅度信息: CSA+极零相消+慢成型+峰保电路
时间信息: 快成型+阈值甄别+正交定时采样



➤ 系统噪声测试

- 目前仅测试64通道
- 等效电荷噪声(ENC) $< 0.088\text{fC}$ (550e)

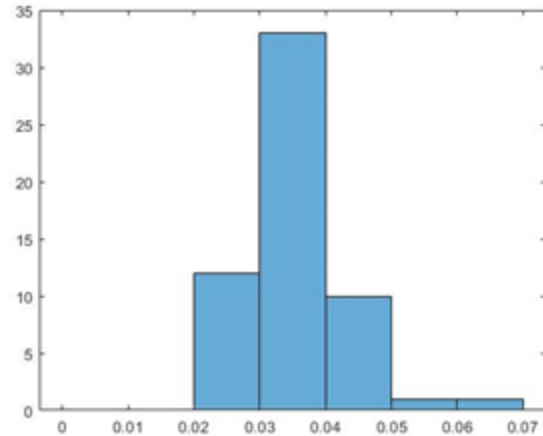
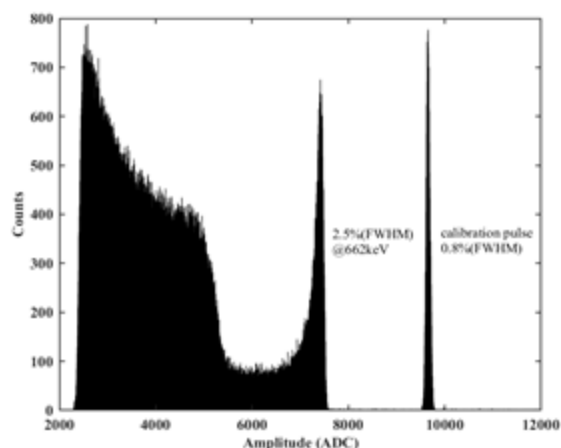


➤ ^{137}Cs 放射源测试

- 大部分通道能量分辨率: 2% ~ 5%

➤ 温漂问题

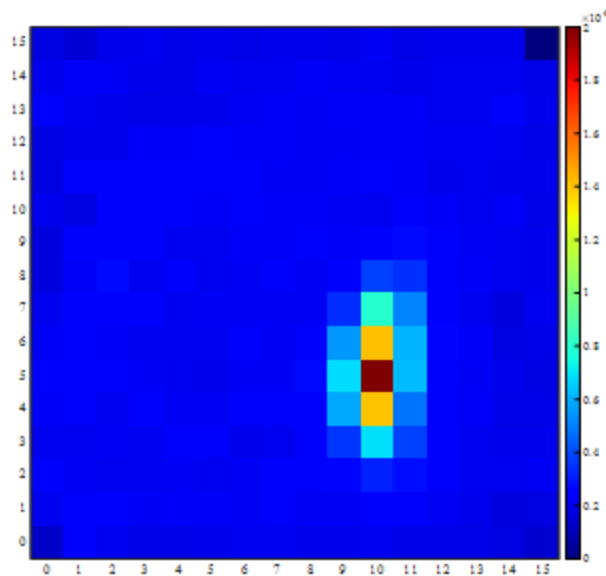
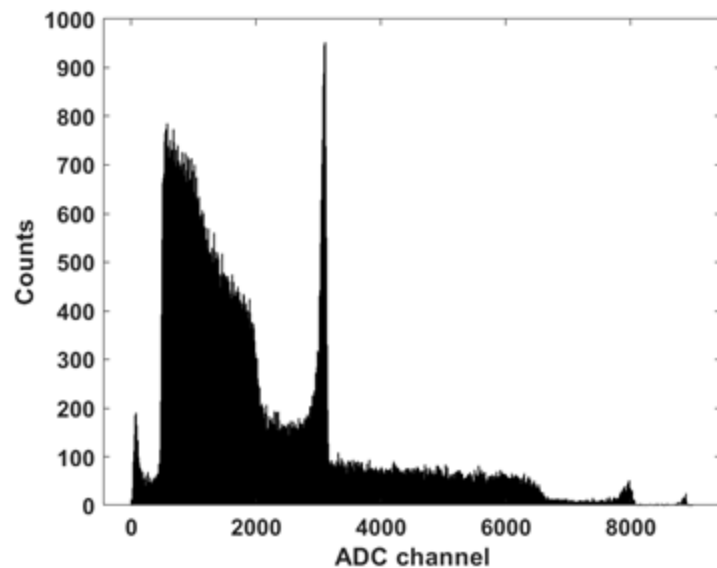
- 通过DAC输出刻度信号对温漂进行修正



各通道分辨率统计

➤ ^{22}Na 放射源小孔成像

- 511keV全能峰计数统计



^{22}Na 单源小孔成像结果



➤完成基于分立器件的读出电子学系统设计

- 完成原型系统样机的搭建并进行系统噪声测试和放射源测试

➤完成基于ASIC的读出电子学系统设计

- 完成原型系统样机的搭建并进行系统噪声测试和放射源测试

➤下一步计划：进一步测试、成像质量评估、图像重建算法



谢谢

谢谢