

第三届全国辐射探测微电子学术交流会 (NME'2023)

# 用于空间环境剂量监测的 宽动态读出ASIC

刘灿文<sup>12</sup> 邓智<sup>12</sup> 刘伟<sup>12</sup> 李福乐<sup>3</sup> 余庆龙<sup>3</sup>

2023-10-22 广西南宁

- 1.清华大学工物系
- 2.粒子与辐射成像教育部重点实验室
- 3.清华大学集成电路学院
- 4.国家空间科学中心空间环境探测实验室

# 大纲



清华大学 工程物理系

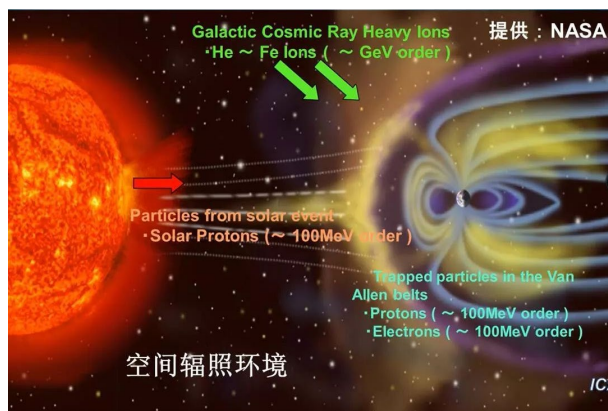
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- ① 背景介绍
- ② 芯片设计
- ③ 芯片测试
- ④ 总结与展望

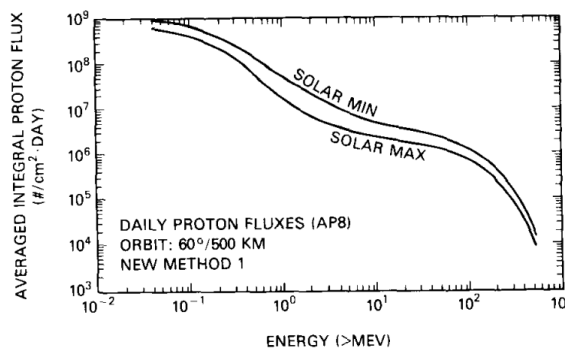
# 背景介绍



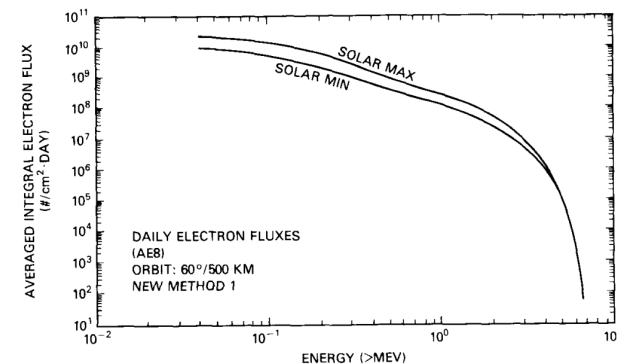
- 空间辐射环境监测——剂量监测
  - 大动态范围
    - 银河宇宙射线、太阳高能粒子、辐射带中被捕获的高能粒子
    - 高能质子、重离子——2MeV-100MeV
    - 电子——50keV-7MeV



空间辐照环境



近地轨道质子谱



近地轨道电子谱

# 背景介绍



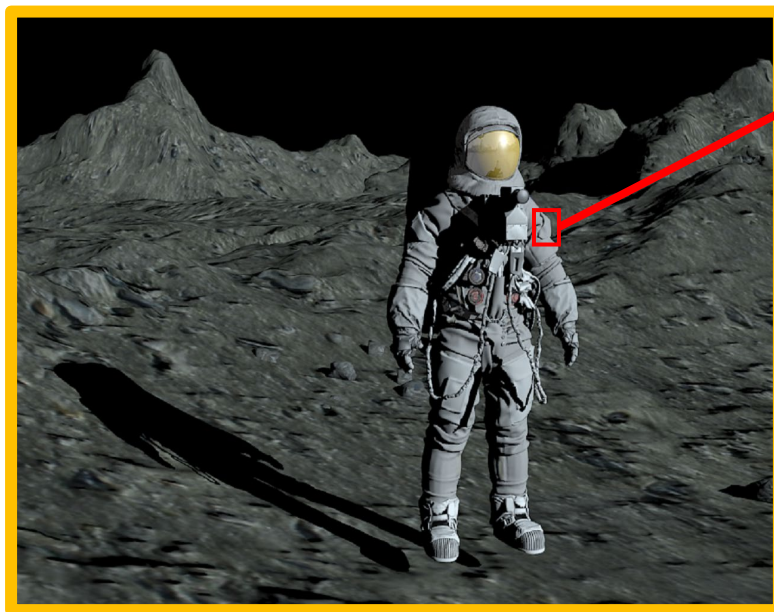
清华大学工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 空间辐射环境监测——剂量监测
  - 便携式
- 宇航员个人剂量监测
  - 便携式辐射剂量仪：小型化；低功耗；长时间电池供电
  - ASIC读出



- <2.64 kg
- < 2.2 W
- 95 mm × 122 mm × 217 mm (h×w×l)

空间辐射环境探测模块



# 背景介绍



- 100MeV的射线在Si中产生4.4pC的电荷量
- 现有的半导体探测器读出芯片
  - VA系列 (挪威IDEAS公司)
  - RENA-3 (美国NOVA公司)
  - IDeF-X (法国原子能所)

宽动态读出ASIC

	VATA450.3	RENA-3	IdeF-X
动态范围	高增益: 16fC	高增益: 9fC	8fC
	低增益: 40fC	低增益: 54fC	
噪声	高增益: 45e+5e/pF	高增益: 150e (零电容)	55e+7e/pF
	低增益: 65e+19e/pF	低增益: 280e (零电容)	
成形时间	3us	0.29-38, 16档	0.9-6
数字化	10bit	无	无
功耗	1mW/ch	6mW/ch	3mW/ch
通道数	64	36	32

# 背景介绍

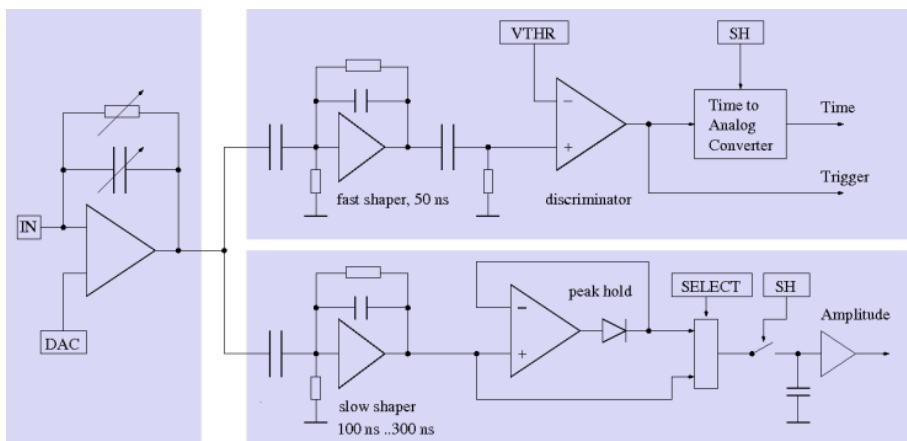


清华大学 工程物理系

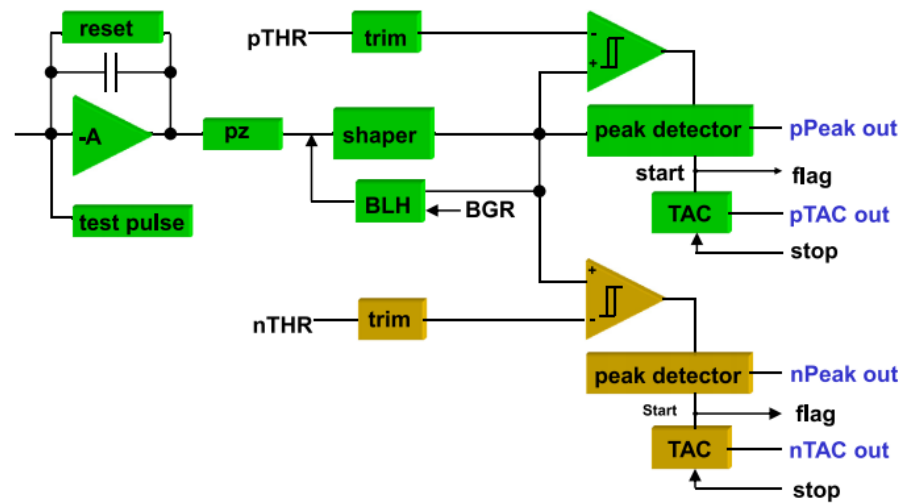
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

## • 提前数字化

- 模拟峰检测，峰值判选存在稳定性问题
- 模拟信号远距离数据传输易受干扰
- 数字化后进行数字峰检测能够有效解决长距离传输及稳定性问题



VATA64HDR16.2



# 大纲



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- ① 背景介绍
- ② 芯片设计
- ③ 芯片测试
- ④ 总结与展望

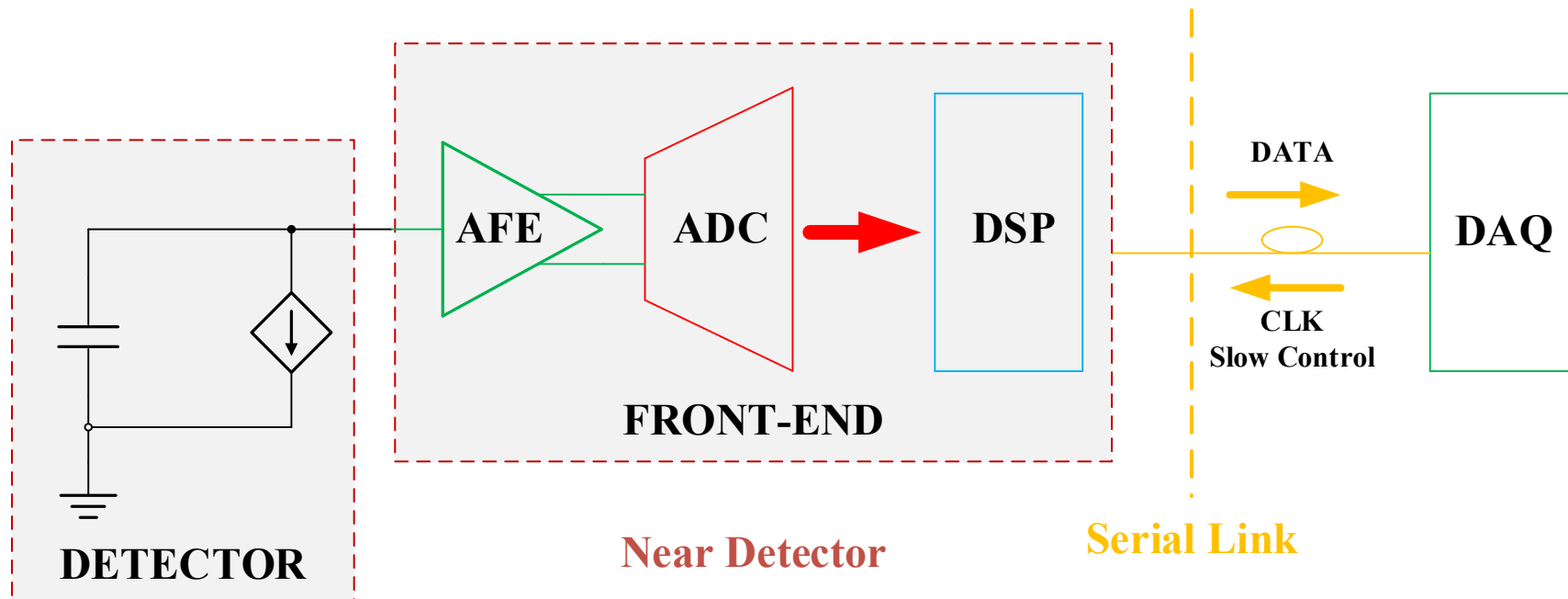
# 芯片设计



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- WDDose: 用于剂量监测的宽动态读出ASIC
- 前放+成形（三挡增益）+ADC+数字滤波+寻峰
- AFE芯片与DSP芯片

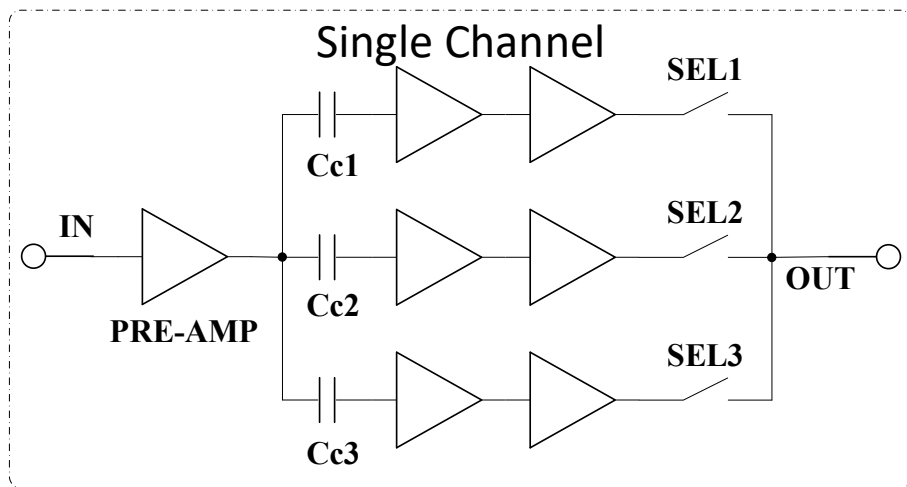




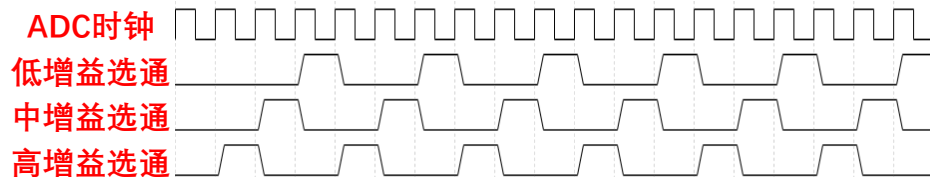
# 芯片设计-AFE



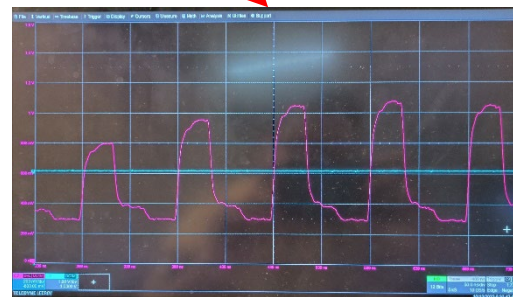
- 每通道三个增益不同的增益档来实现大动态范围
- 通过选通开关同时输出三个增益档的波形



单通道结构示意图



选通信号



前端芯片输出波形示意

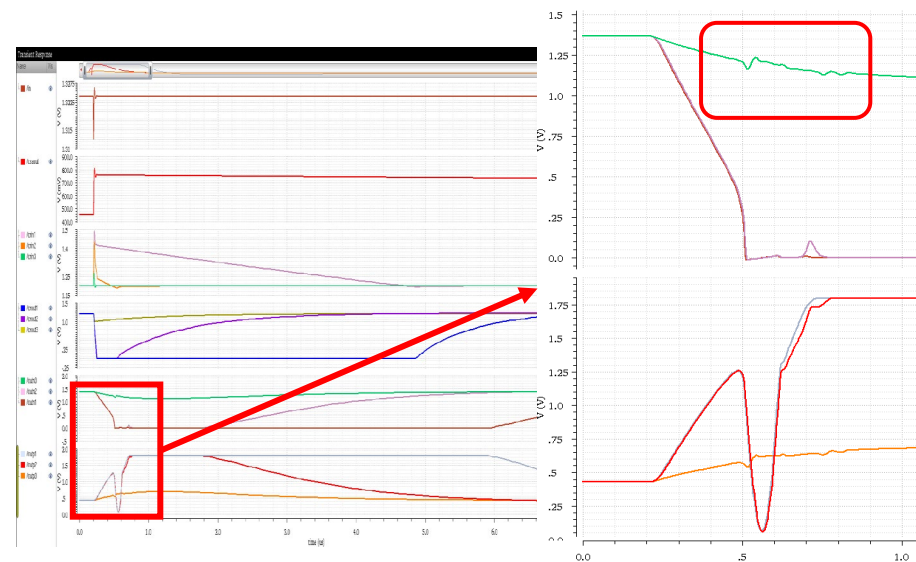
# 芯片设计-AFE



- 可能出现通道内串扰
- 高增益档饱和后，会经过Cc影响中增益档与低增益档输出波形



前端芯片输出波形示意

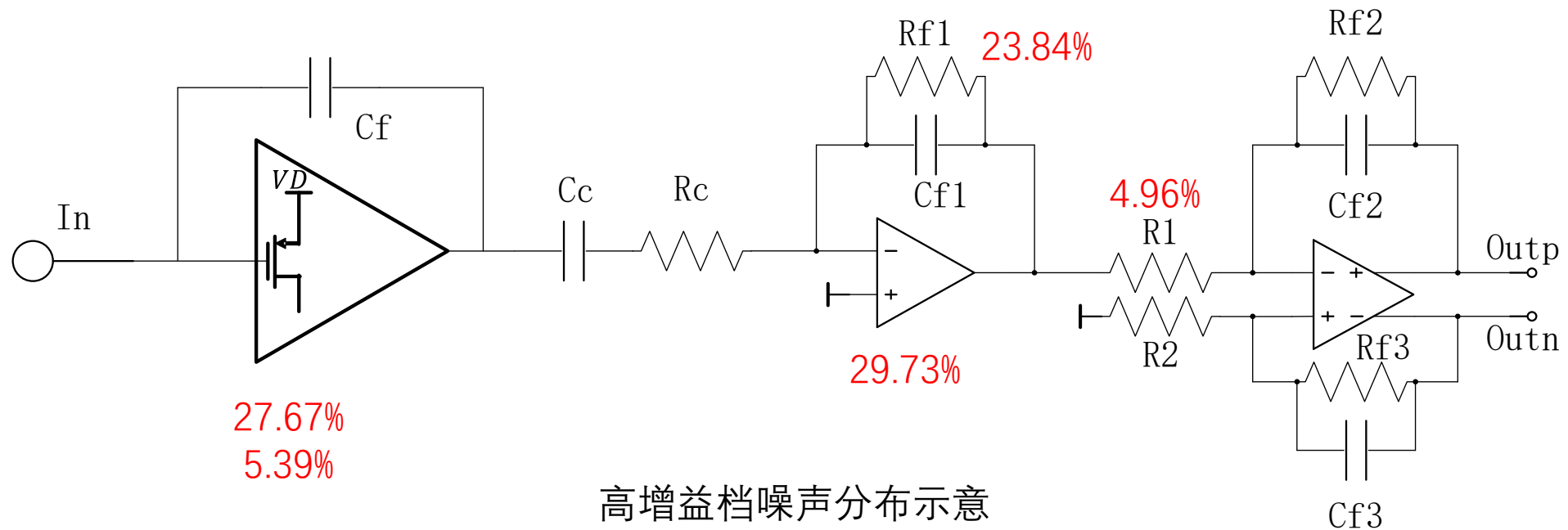


通道内串扰仿真示意

# 芯片设计-AFE



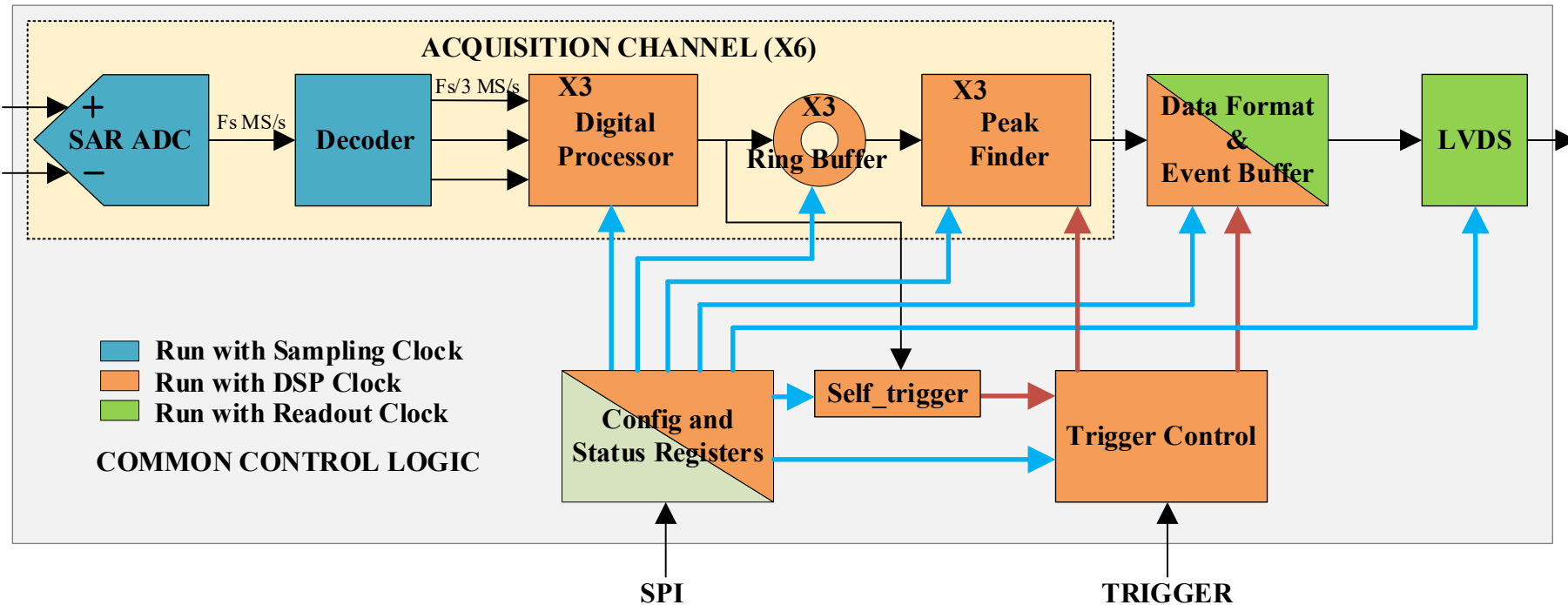
- 受到电源电压和动态范围需求的限制，高增益档增益受限，后级成形电路放大器引入的噪声无法忽略， $R_{f1}$ 引入的噪声无法忽略
- 噪声优化综合考虑前放和CR成形电路，做整体优化



# 芯片设计-DSP



- 波形采样SAR ADC（李福乐老师提供）、解码器、数字梯形滤波器（参数可调）、寻峰（参数可调）
- 触发控制、慢控制、数据打包与数据输出



# 芯片设计-DSP

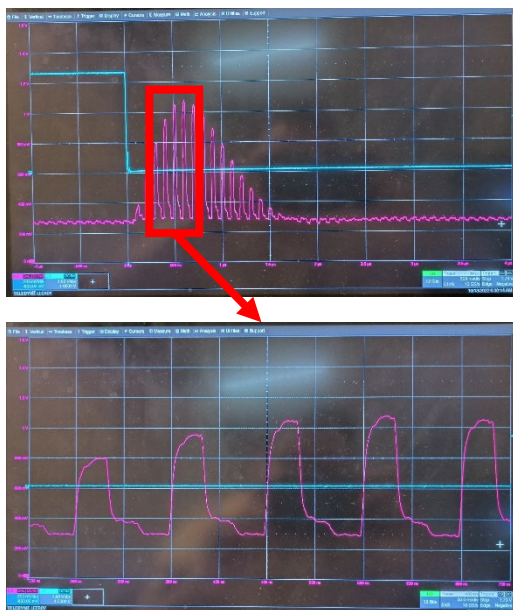


清华大学工程物理系

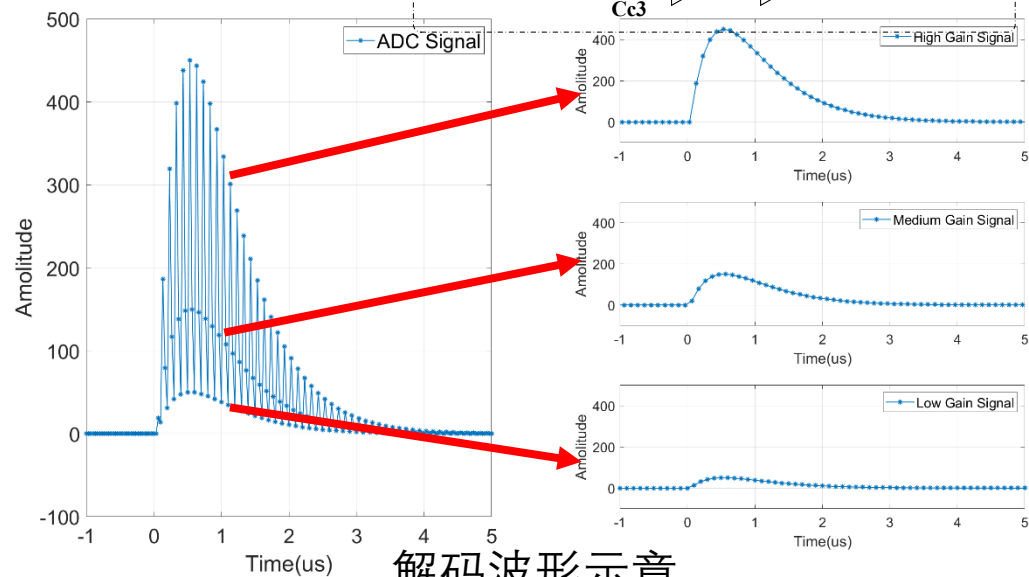
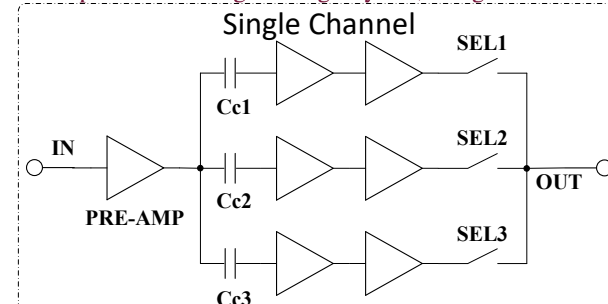
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

## • 解码模块

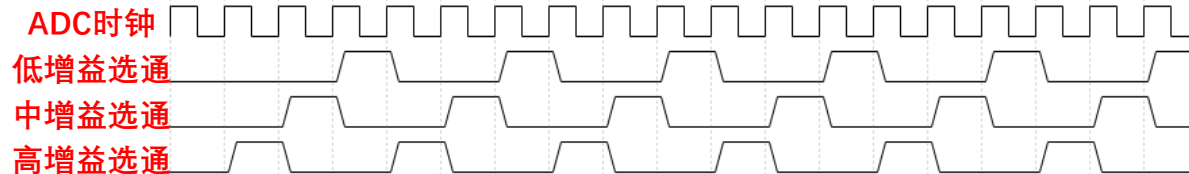
- 模拟前端输出每隔3个ADC时钟周期跳转增益档输出
- 数字化之后波形为高、中、低交替出现
- 解码模块按时间将三个增益档波形分开



前端芯片输出波形示意



解码波形示意



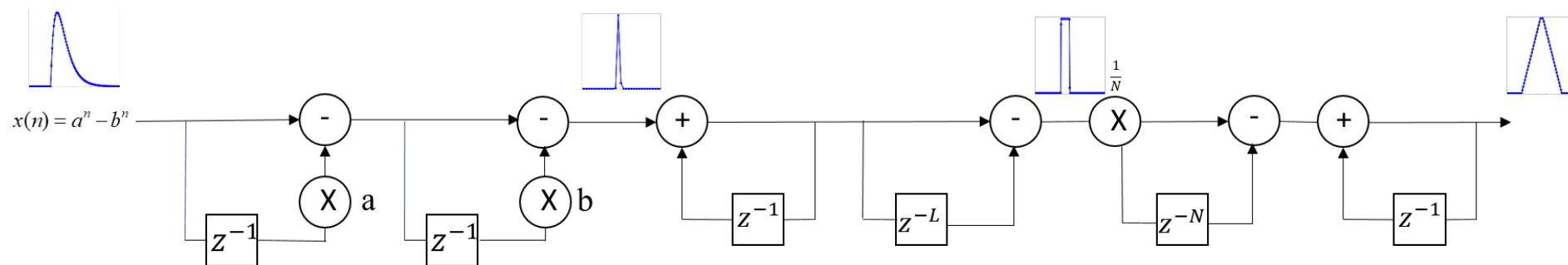
大动态前端芯片选通信号示意

# 芯片设计-DSP



- 数字梯形滤波器

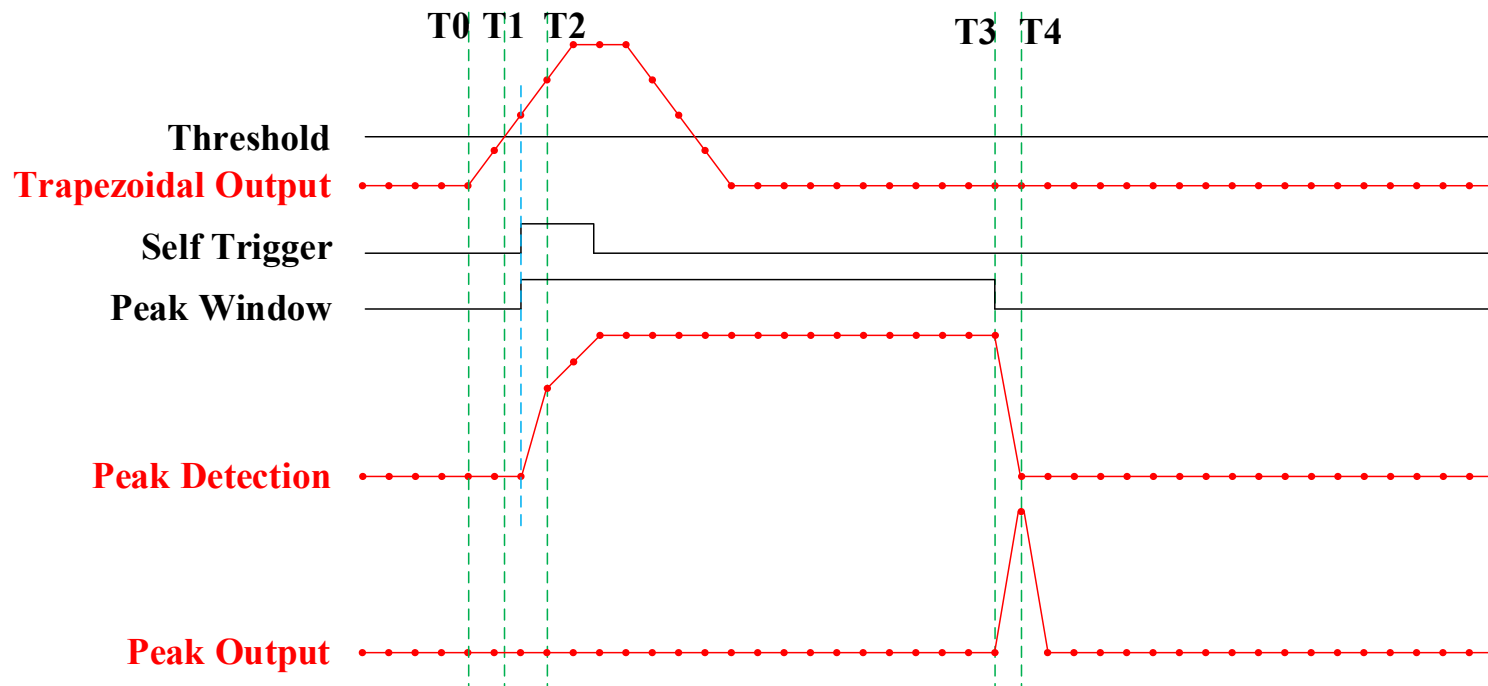
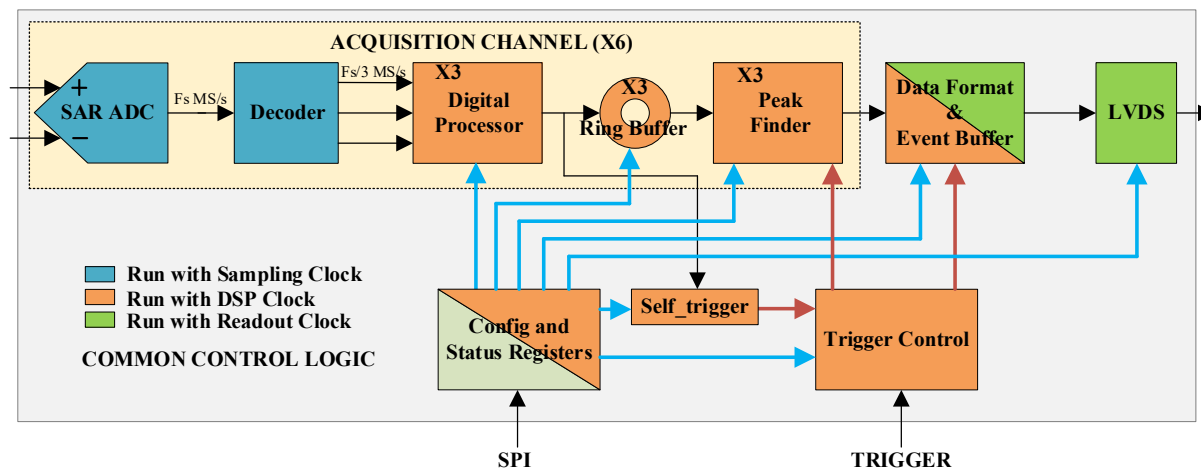
- 两级反卷积模块：反卷积参数可根据模拟成形时间调整
- 两级积分成形模块：梯形上升点数和平顶点数可调



# 芯片设计-DSP

## • 寻峰模块

- 梯形输出过阈产生自触发信号
- 自触发信号到达，打开寻峰窗
- 取窗内最大值作为峰值输出



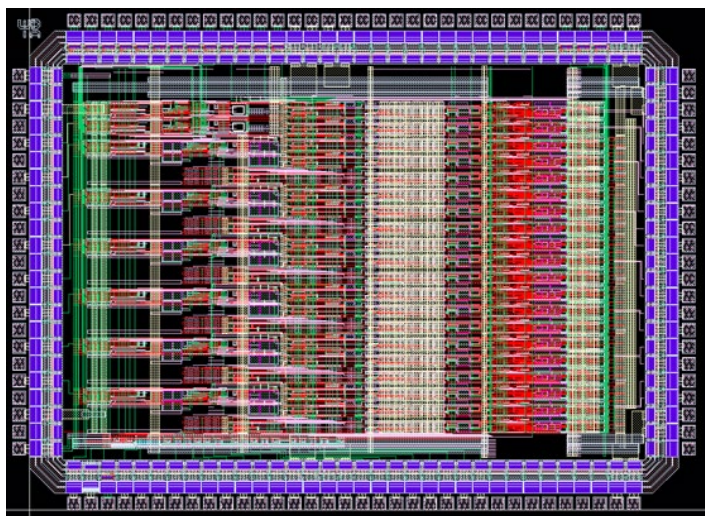
# 芯片设计-总结



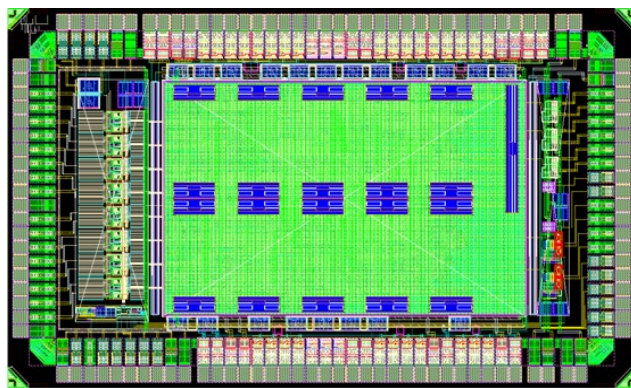
清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

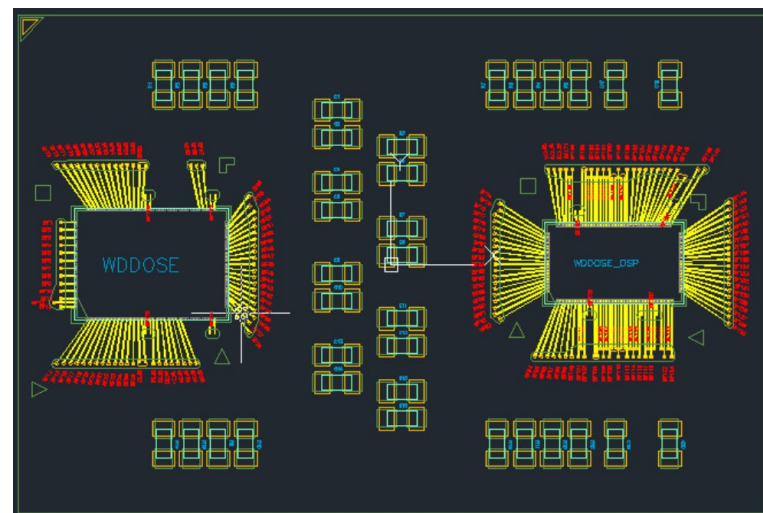
- 噪声优化: 模拟前端采用180nm工艺
- 功耗优化: 数字滤波采用65nm工艺
- 模拟前端和数字滤波芯片, 后通过封装当作一颗芯片使用
- 前放+成形 (三挡增益) +ADC+数字滤波+寻峰



3.1mm × 2.3mm  
模拟前端芯片版图



2.8mm × 1.7mm  
数字滤波芯片版图





# 大纲



清华大学工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

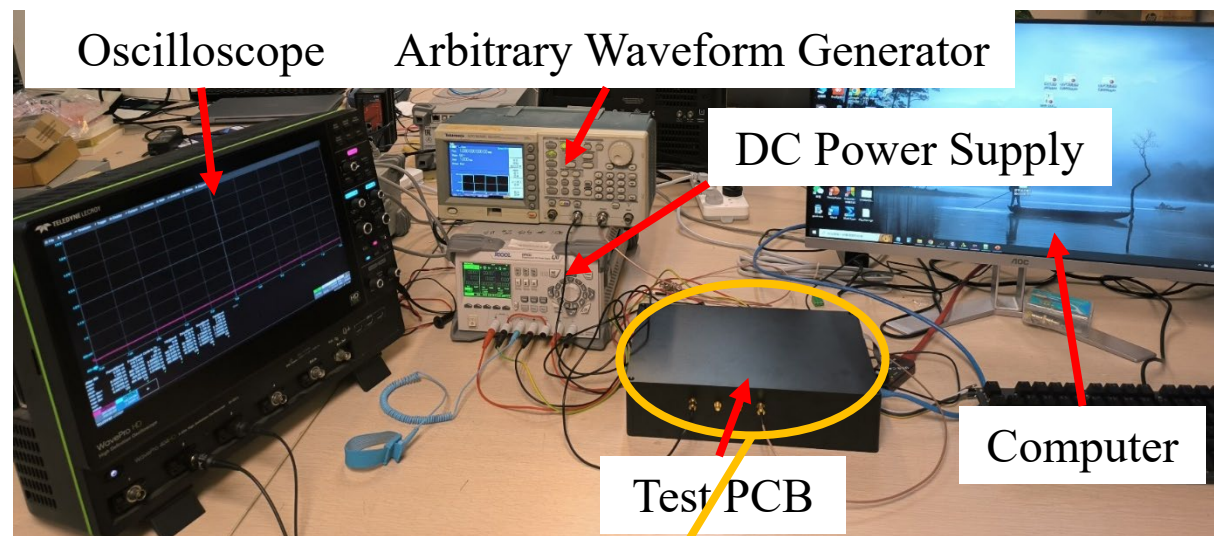
- ① 背景介绍
- ② 芯片设计
- ③ 芯片测试
- ④ 总结与展望

# 电子学测试-测试系统



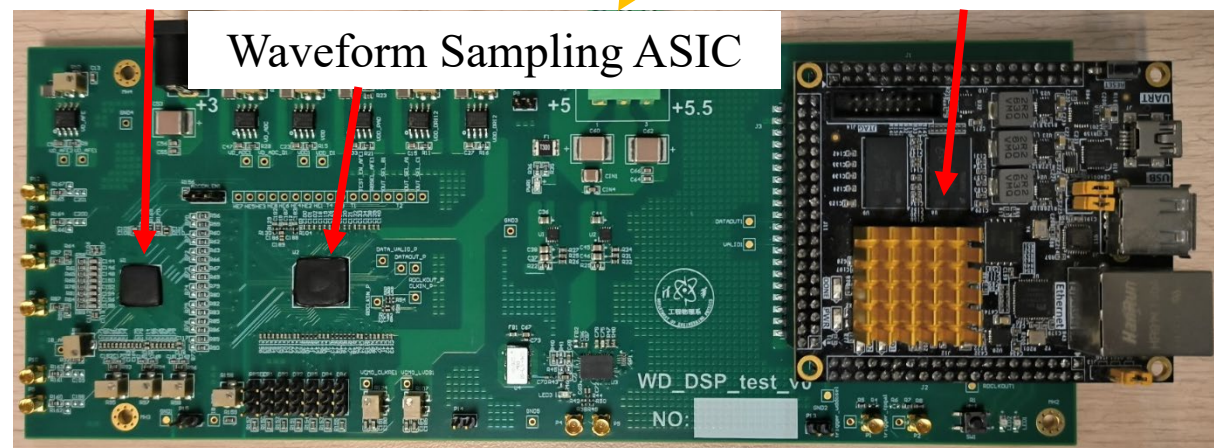
清华大学 工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 测试系统



Analog Front-end ASIC

ZYNQ Core Board

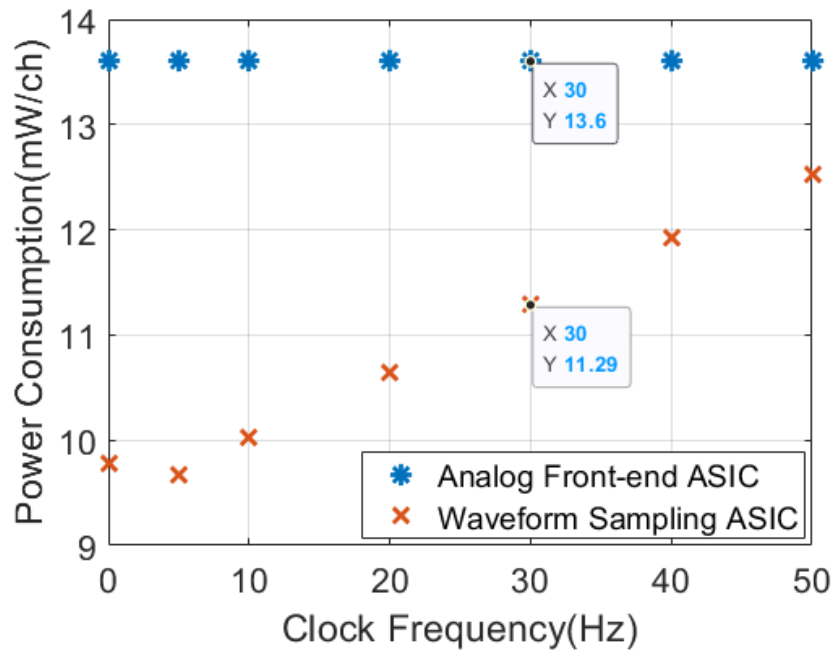


# 电子学测试-功耗

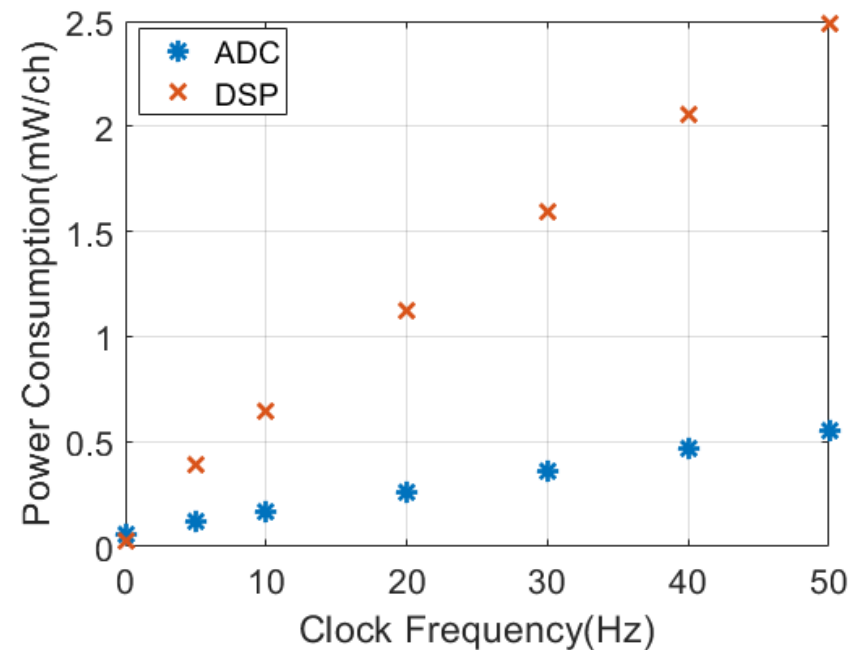


## • 功耗测试结果

- AFE芯片单通道功耗13.6mW
- DSP芯片功耗随时钟频率提高线性增加，单通道功耗11.3mW@30MHz
- 时钟频率30MHz时，AFE芯片和DSP芯片总的单通道功耗不超过25mW



AFE芯片及DSP芯片功耗



ADC及DSP功耗

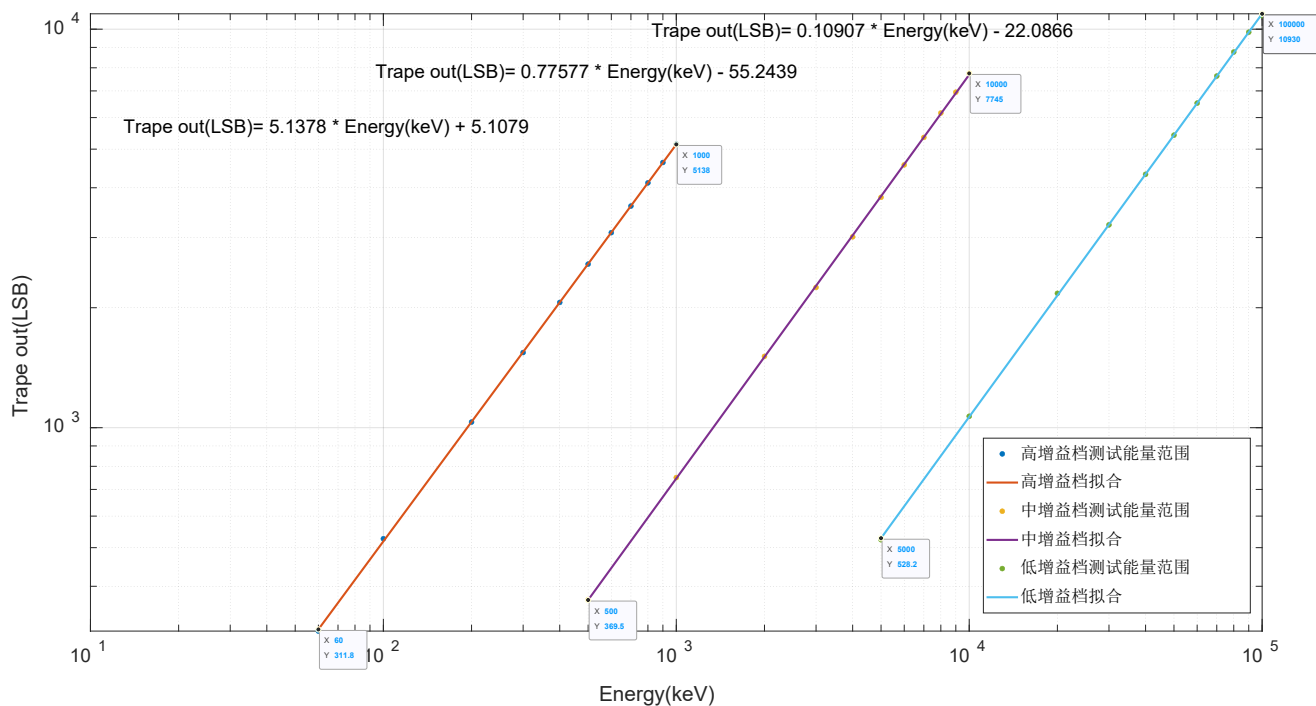
# 电子学测试-能量范围



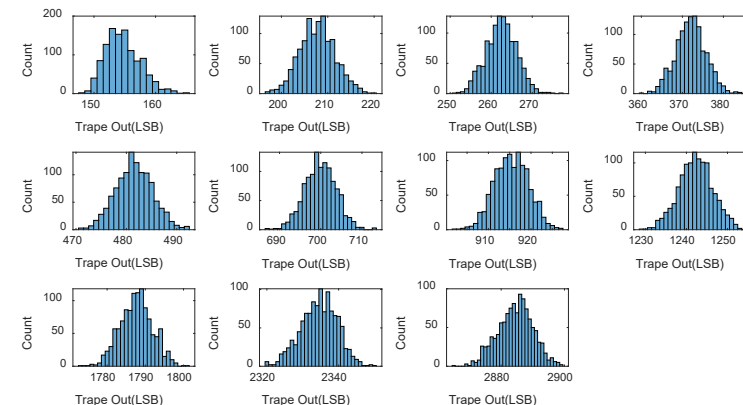
清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

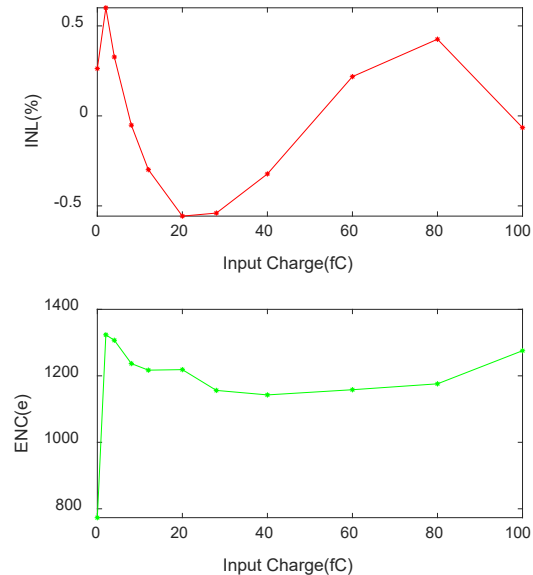
- 能量范围测试结果
  - 宽动态档能量范围1.25fC- 4.4pC
  - INL不超过1%



宽动态能量范围测试结果



高增益档不同能量输入的幅度谱

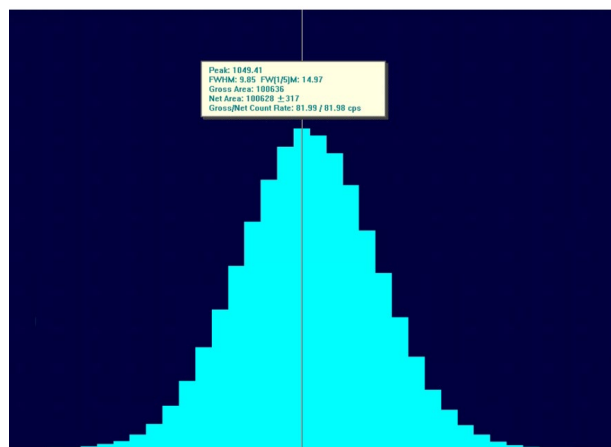


高增益档的线性与噪声

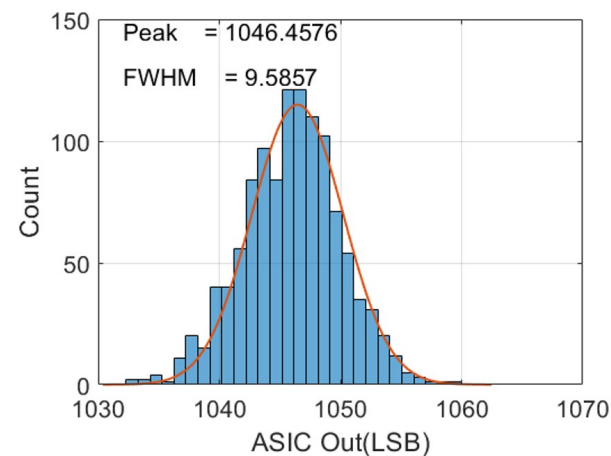
# 电子学测试-噪声



- 宽动态通道高增益档ENC约1100e



多道幅度谱



DSP幅度谱

	Gain(LSB/fC)	Peak FWHM(LSB)	ENC(e)
MCA	23.41	9.85	1117
DSP ASIC	22.24	9.58	1143

噪声测量结果 (Cin=50pF)

# 电子学测试-总结



清华大学工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

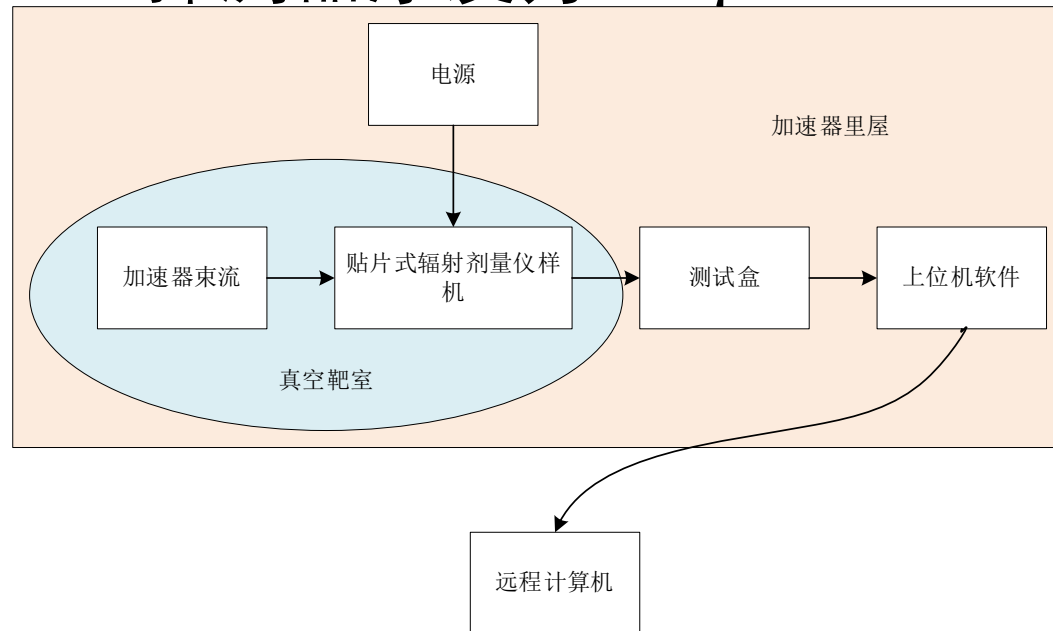
性能指标	实测结果
能量范围	60 keV-100 MeV
信号极性	电子/空穴, 可独立配置
通道数	6 (宽动态) +2 (高增益)
等效噪声电荷	~1100e
单通道功耗	13.6mW+11.3mW
计数率	>1000 cps
触发阈值	13bit全局阈值+4bit局部阈值
达峰时间	200ns-6300ns
输出方式	数字串行输出

# 束流测试-测试系统

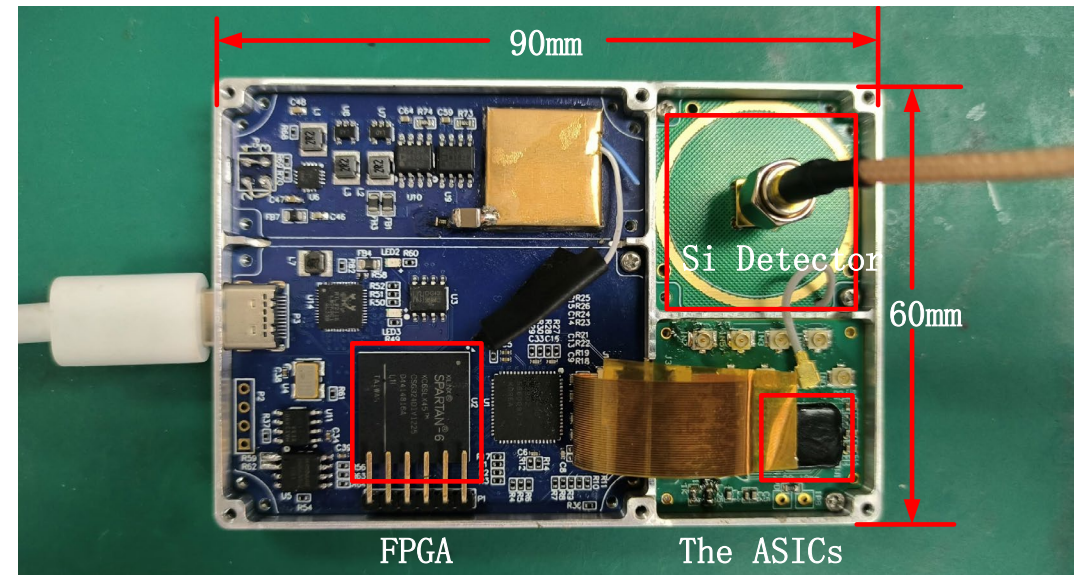


清华大学工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 测试系统
- Si探测器厚度为 $300\mu m$



测试系统框图

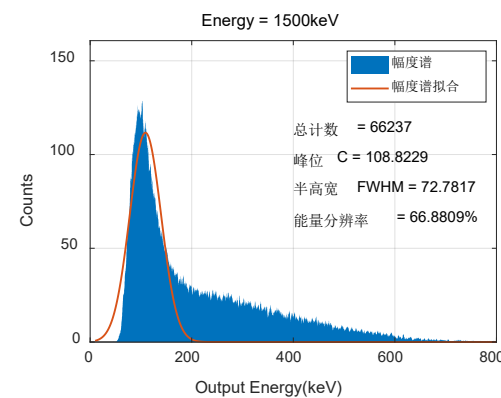
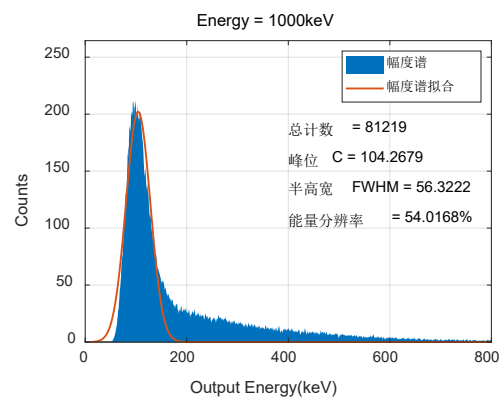
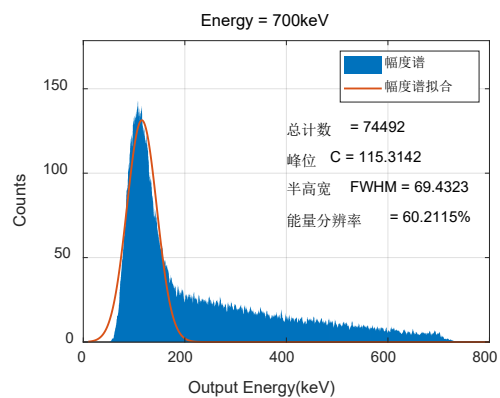
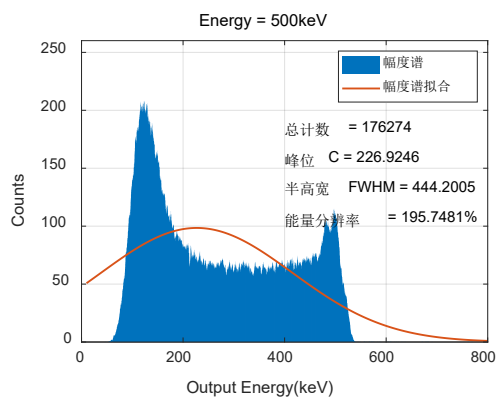
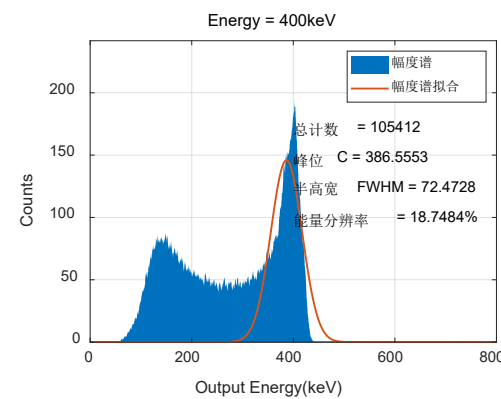
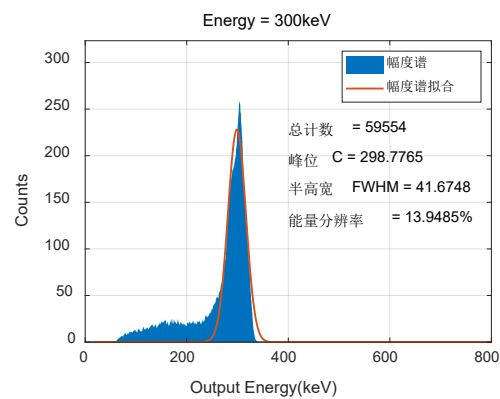
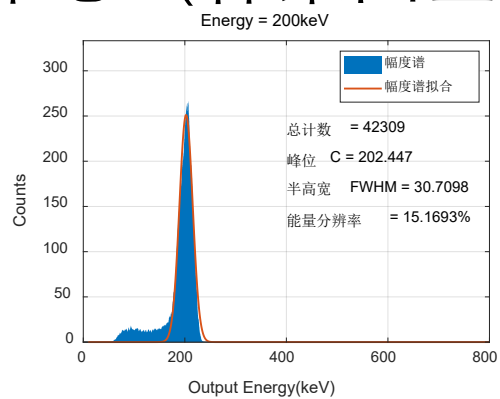
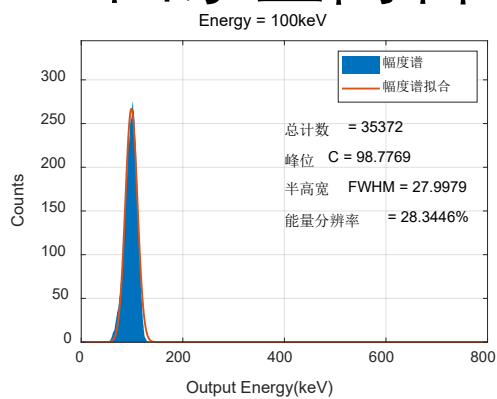


贴片式辐射测量仪

# 束流测试-电子束流



- 高增益档
- 国家空间科学中心 (怀柔园区)



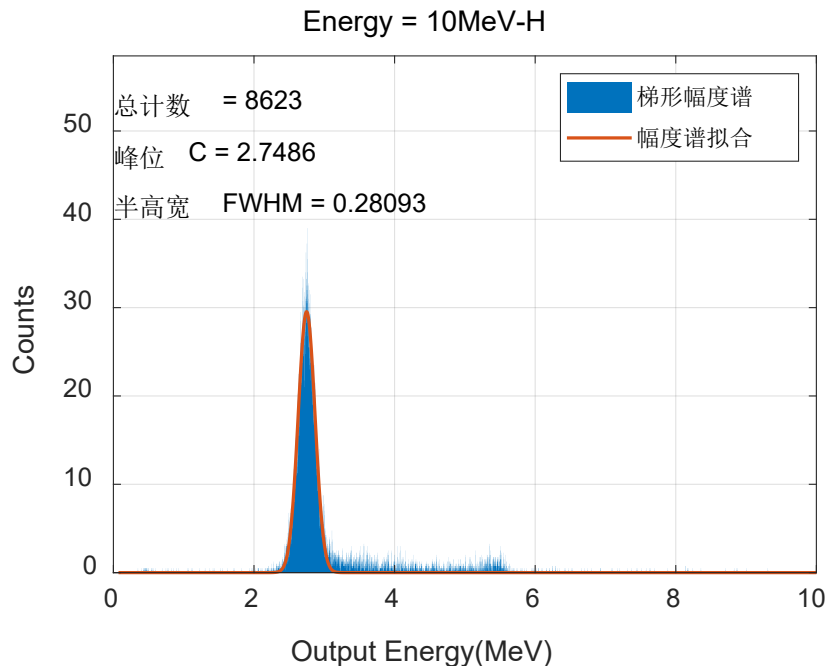


# 束流测试-质子束流

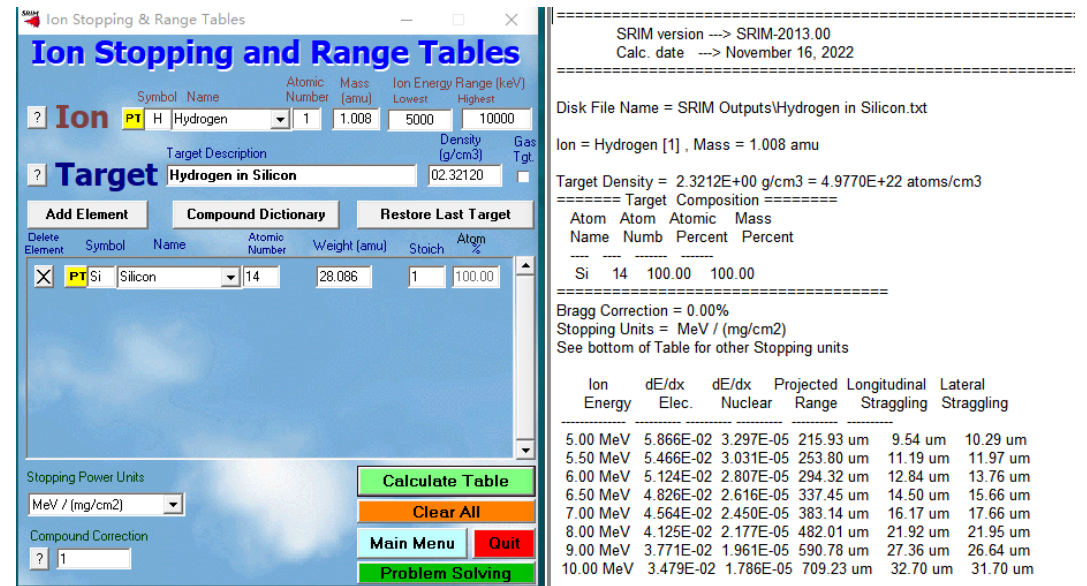


清华大学工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 中增益档
- 中国原子能研究院HI-3串列加速器



10MeV的质子穿透峰



SRIM仿真质子在Si中沉积能量  
(300um Si沉积约2.84MeV)

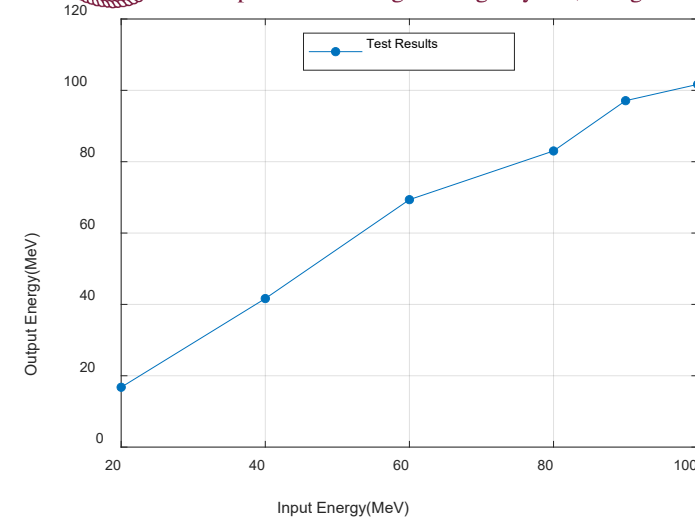
# 重离子束流测试



清华大学工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 低增益档
- 中国原子能研究院HI-3串列加速器

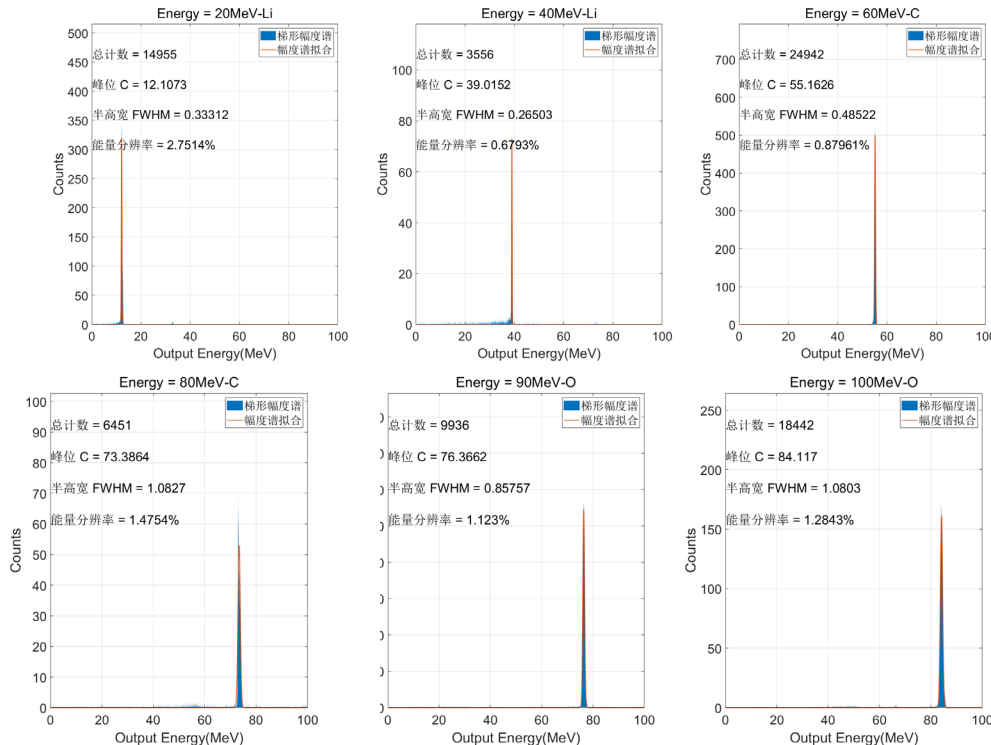


校正后沉积能量曲线

入射粒子能量 MeV	探测器仿真沉积能量* MeV	实际测量能量 MeV	FWHM MeV	能量分辨率 %
20	38.062	39.015	0.265	0.679
40	40.055	42.25	0.577	1.365
60	51.67	55.163	0.485	0.88
80	65.808	67.447	0.51	0.757
90	73.293	73.386	1.083	1.475
100	76.846	76.366	0.858	1.123

不同能量离子能谱情况

\*表示穿过挡光层后沉积的能量



# 大纲



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- ① 背景介绍
- ② 芯片设计
- ③ 芯片测试
- ④ 总结与展望

# 总结



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 宽动态范围模拟前端芯片
  - 单通道同时读出的动态范围1.25fC-4.4pC
  - ENC<1200e
- 全数字波形采样芯片
  - 数字滤波和峰检测功能的芯片集成
  - 两芯片通过封装作为一颗芯片使用, 芯片功耗<25mW/ch
- 电子学测试与束流测试

# 展望



清华大学工程物理系  
Department of Engineering Physics, Tsinghua University

- 噪声优化
  - 现有芯片可探测60keV能峰
- 多道功能的集成
  - 现有芯片为输出每个通道的幅值数据，后期再对数据进行处理，得到能谱
- 单通道阈值位宽提高
- .....



清华大学 工程物理系

Department of Engineering Physics, Tsinghua University

谢谢聆听