

# KM2A电子学系统设计

报告人：常劲帆

中科院高能物理所实验物理中心  
核探测与核电子学国家重点实验室

2017-1-18



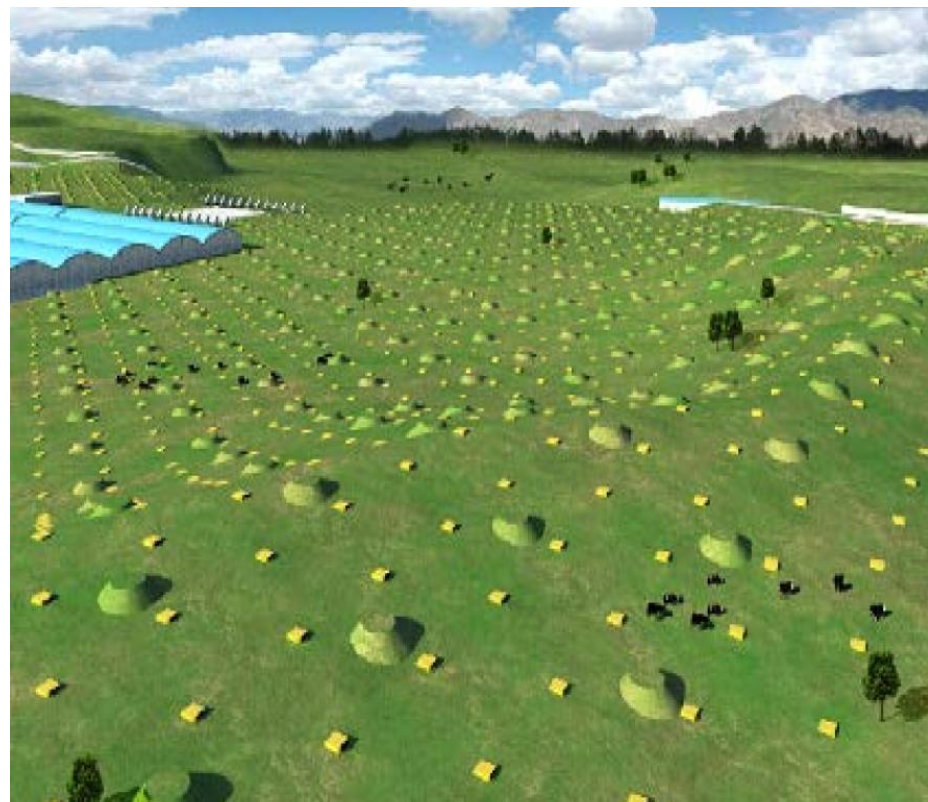
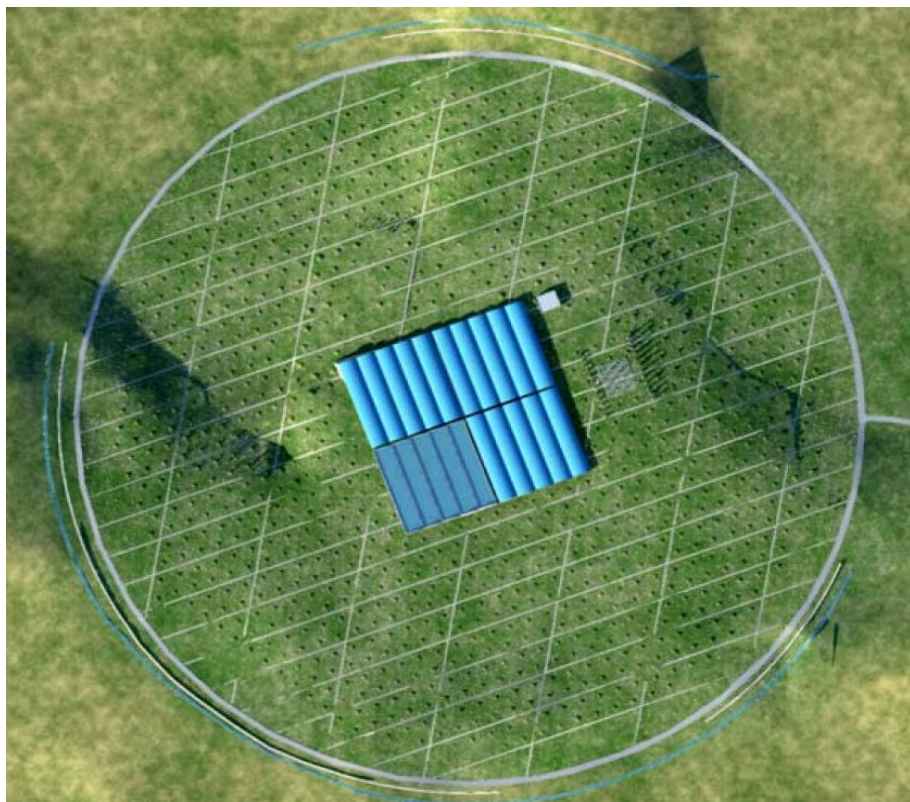
# 报告内容

- 电子学总体设计
- 电子学设计需求及指标
- 方案设计及实现
- 电子学性能测试结果



# 电子学总体设计

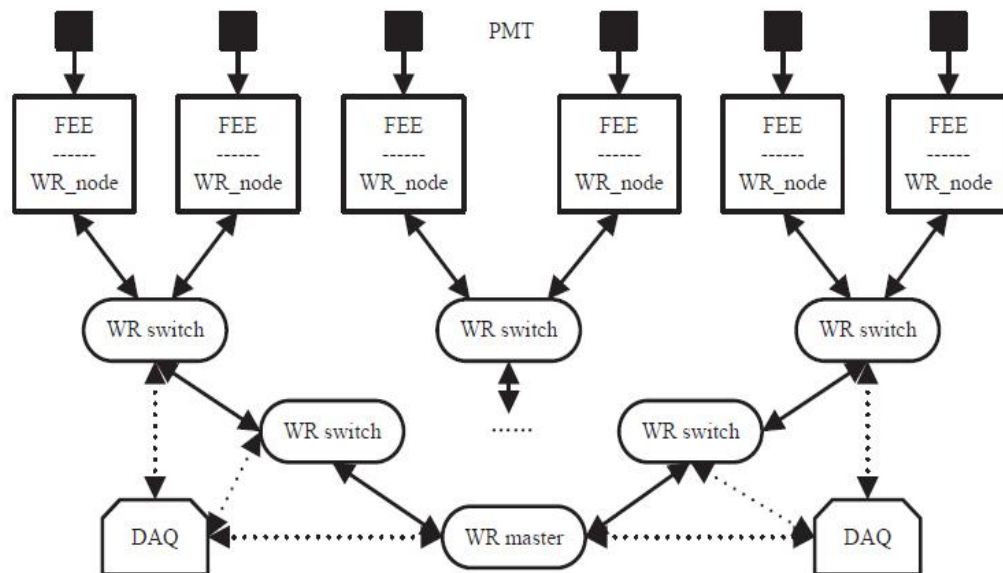
- 1km<sup>2</sup>有效探测面积
- 5195个ED探测器，间距15米
- 1171个缪子探测器，间距30米





# 电子学总体设计

- 分布式前端数字化方案
- 基于WR的标准以太网数据、时钟融合传输
- 无硬件全局触发 “triggerless”





# 电子学设计需求

## ■ ED电子学设计需求

参数	设计指标
通道数	5195
阳极电荷测量动态范围	1.28pC-256pC
打拿级电荷测量动态范围	0.64pC-128pC
电荷测量精度	10%@0.64pC, 5%@128pC
时间测量精度	1ns
单探测单元平均事例率	2KHz
稳定工作温度范围	-25°C-+35°C

## ■ ED电子学主要功能

- 大动态范围高精度的电荷、时间同时测量



# 电子学设计需求

## ■ MD电子学设计需求

技术参数	指标
通道数 (Number of channels)	1171
态范围 (Dynamic Range)	1-10000 $\mu$
能量分辨 (Resolution)	25% @ 1 $\mu$ ; <5% @ 10000 $\mu$
时间分辨 (Time resolution)	10ns
单道事例率 (hit rate)	10KHz
阈值 (threshold)	0.25 $\mu$
温度范围 (Operating range)	-30 to 40°C

## ■ MD电子学主要功能

- 大动态范围高精度的电荷测量
- 信号波形实时获取



# 电子学设计需求

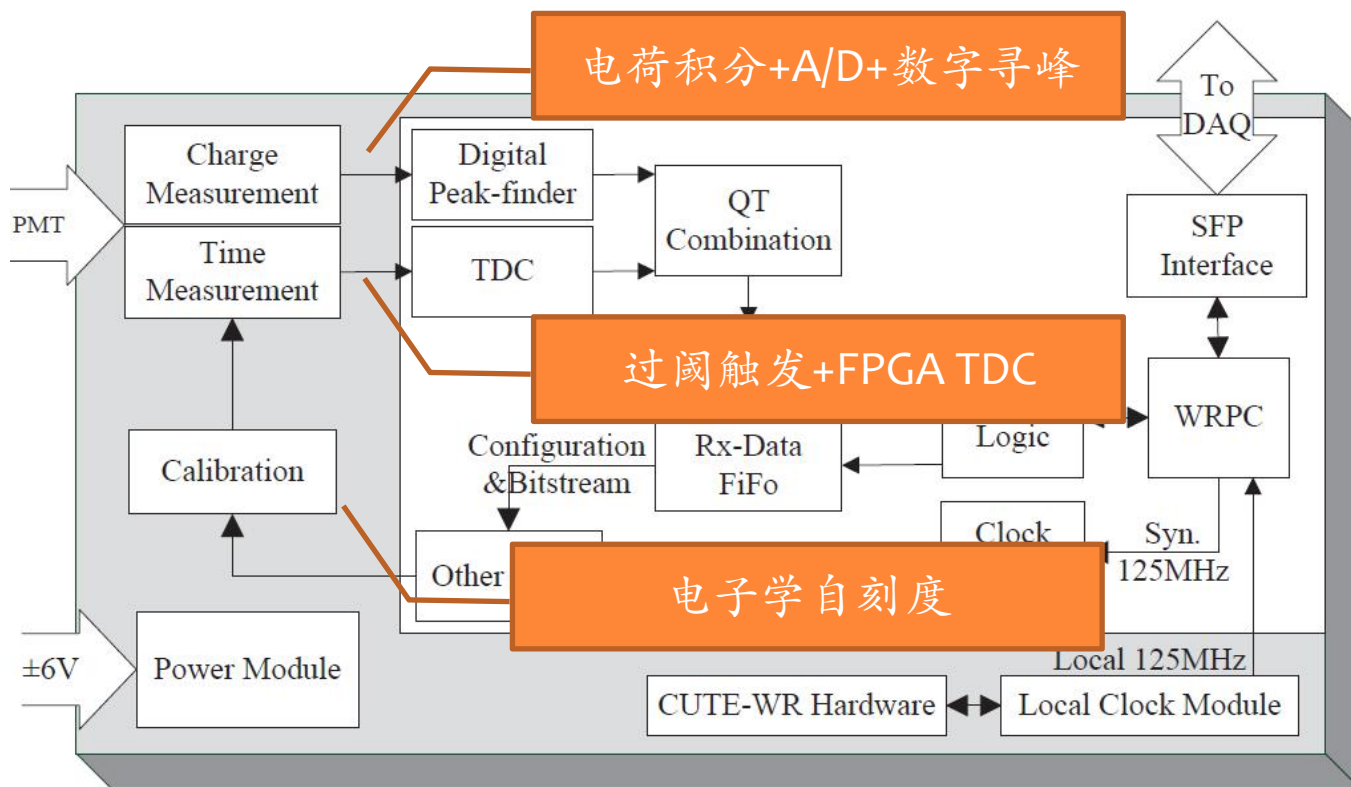
- 实验数据、慢控数据融合传输
- 基于标准以太网TCP/IP协议的数据传输方式
- 大范围、多插件FPGA的固件远程更新
- 电子学自刻度



# ED电子学设计

## ED电子学设计

- 电荷积分法的电荷测量
- 前沿甄别基于FPGA的TDC



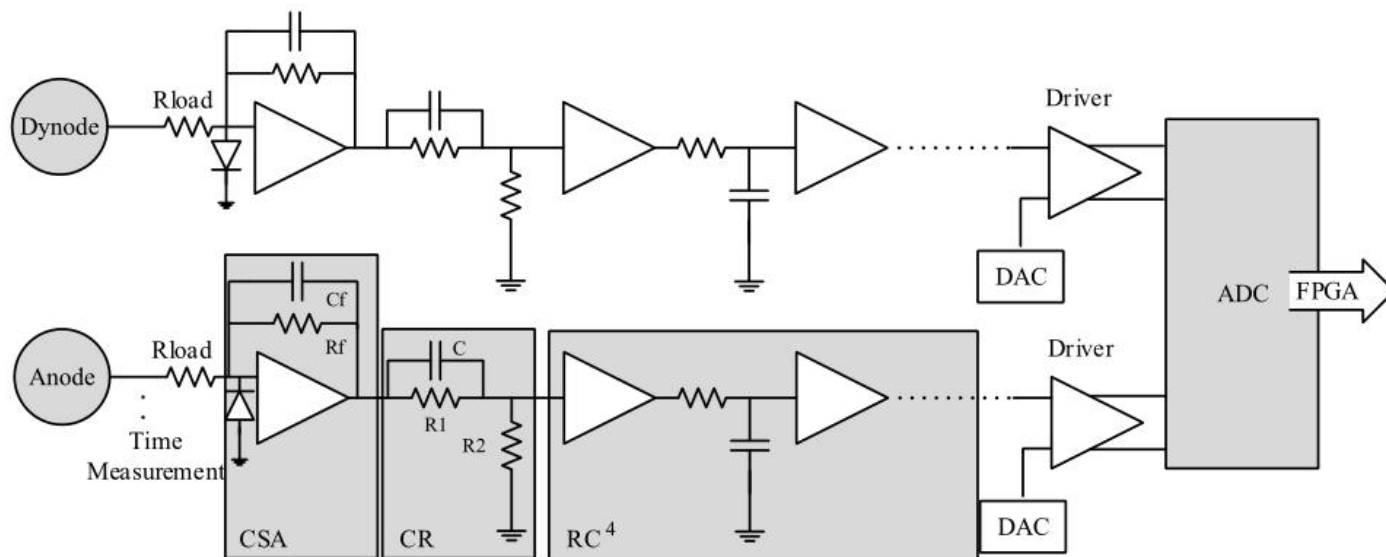
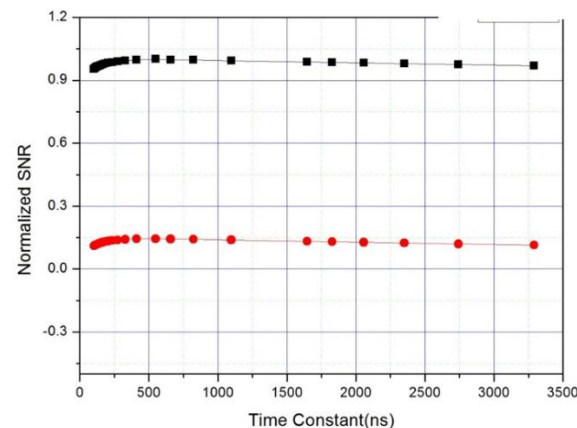


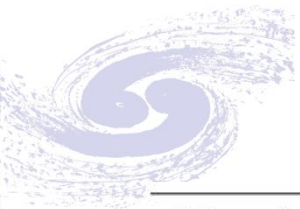


# ED电子学设计

## ■ 电荷测量方案

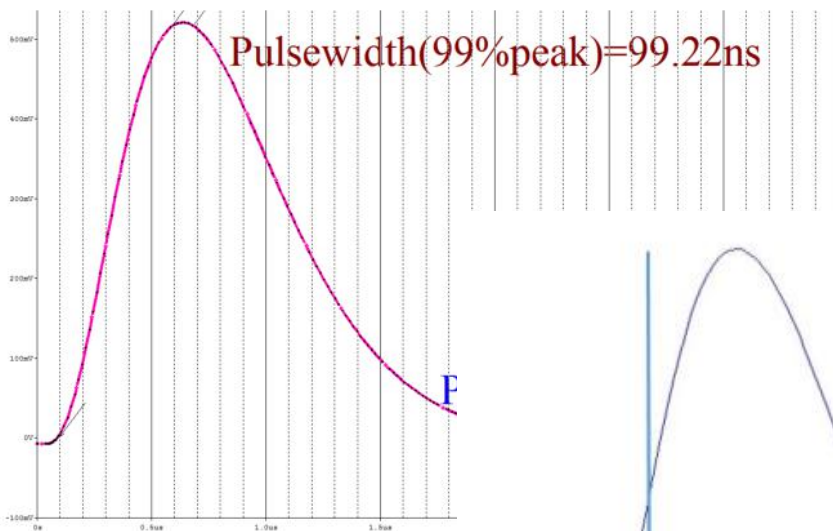
- CAS-(CR)-(RC)<sup>4</sup>
- 串连电阻，虚地匹配



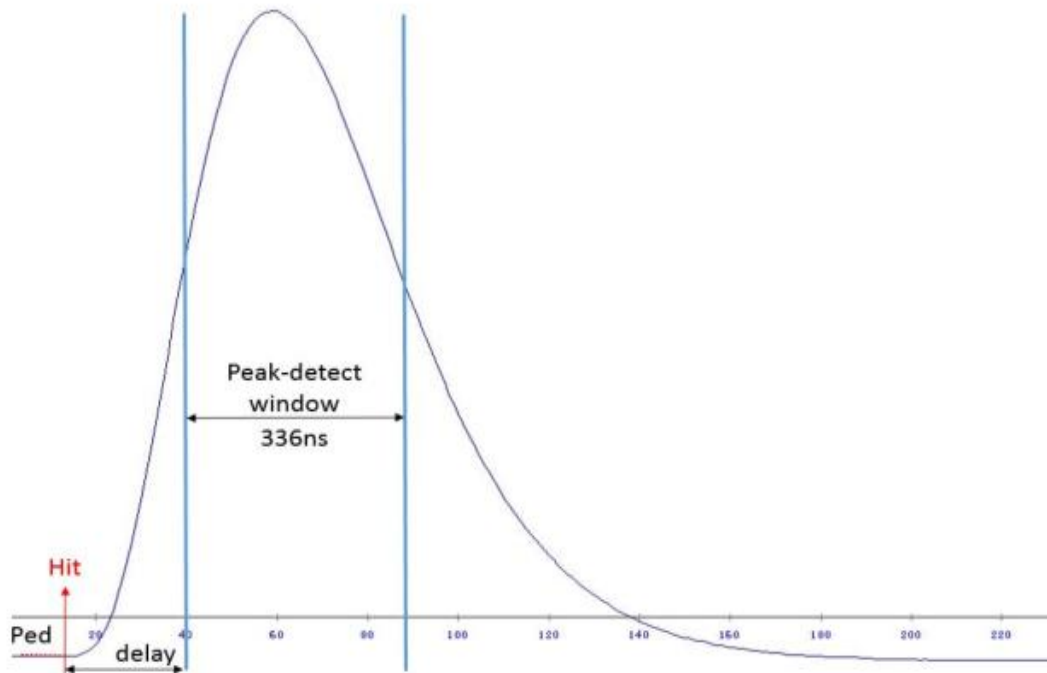


# ED电子学设计

Rload	Rf	Cf	C	R1	R2
50Ω	80.6KΩ	82pF	820pF	8.06KΩ	249Ω



采样精度：  
99%峰值脉宽内能采5个点，

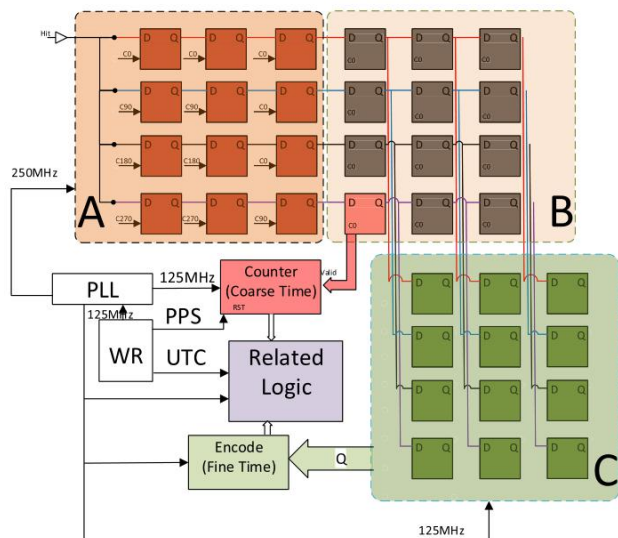
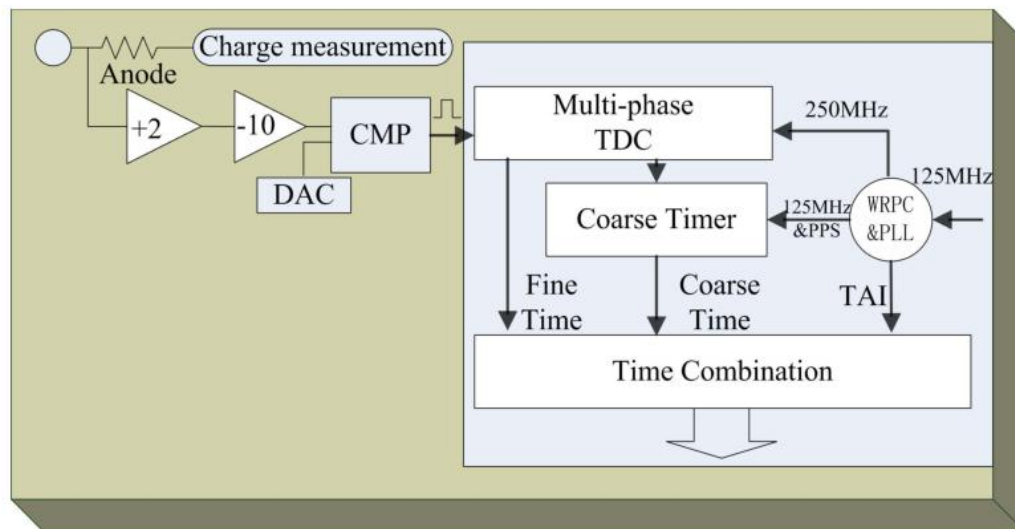




# ED电子学设计

## ■ 时间测量方案

- 前沿甄别
- 时钟多项位TDC



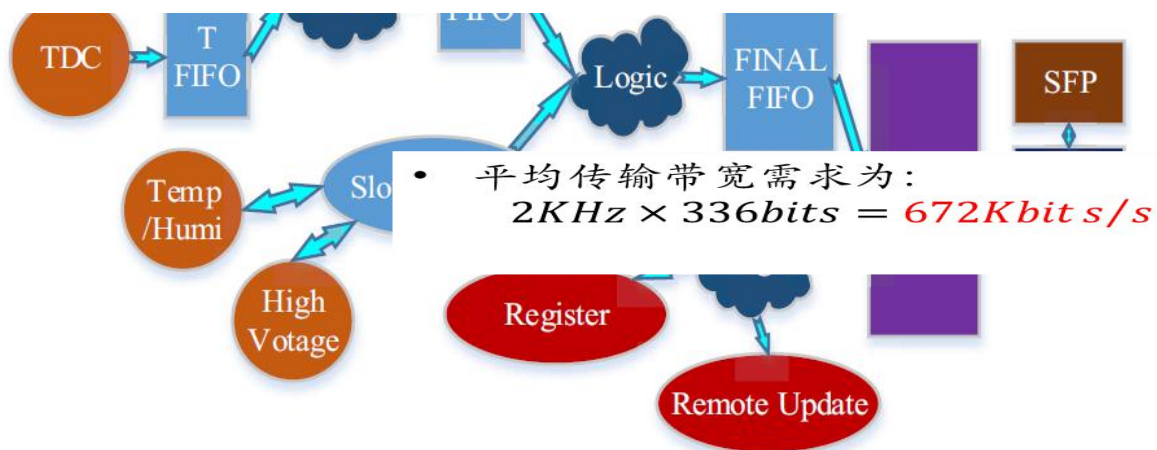
- 250MHz时钟四分相，Binsize=1ns
- 125MHz时钟驱动粗时间计数器，PPS复位计数器，动态范围1s
- 细时间、粗时间和绝对时间戳组成事例时间



# ED电子学设计

## ■ 数据传输方案

包头	数据头	数据	数据尾	包尾
128bits	8bits	160bits	8bits	32bits



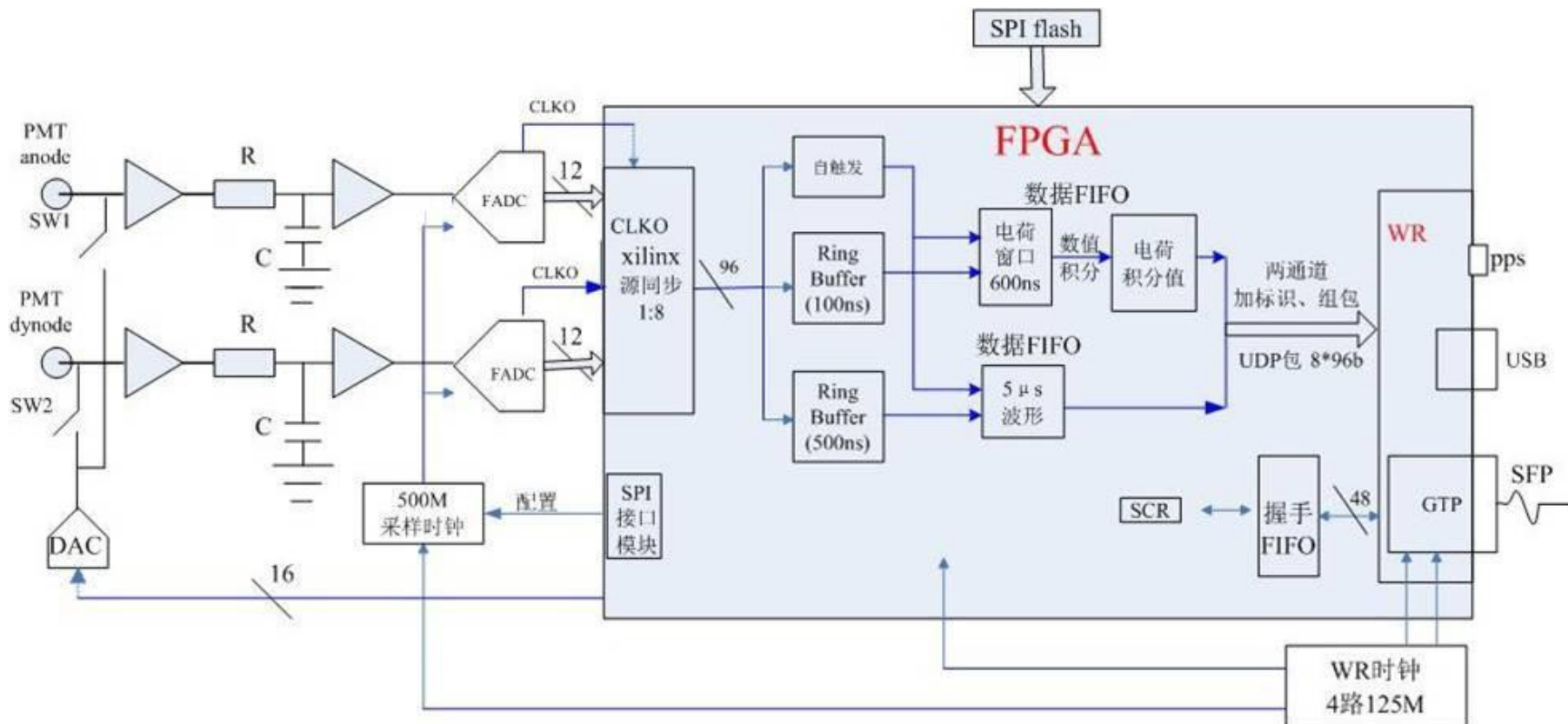
- 采用三级缓存流水线模式进行组装与传输
- 上行数据包含：
  - 事例数据：电荷信息、时间信息
  - 慢控数据：探测器温湿度、电子学温度、高压工作状态等
  - **定时读出模式**，定时间隔可配置
- 下行数据包含：指令、更新文件



# MD电子学设计

## ■ MD电子学设计

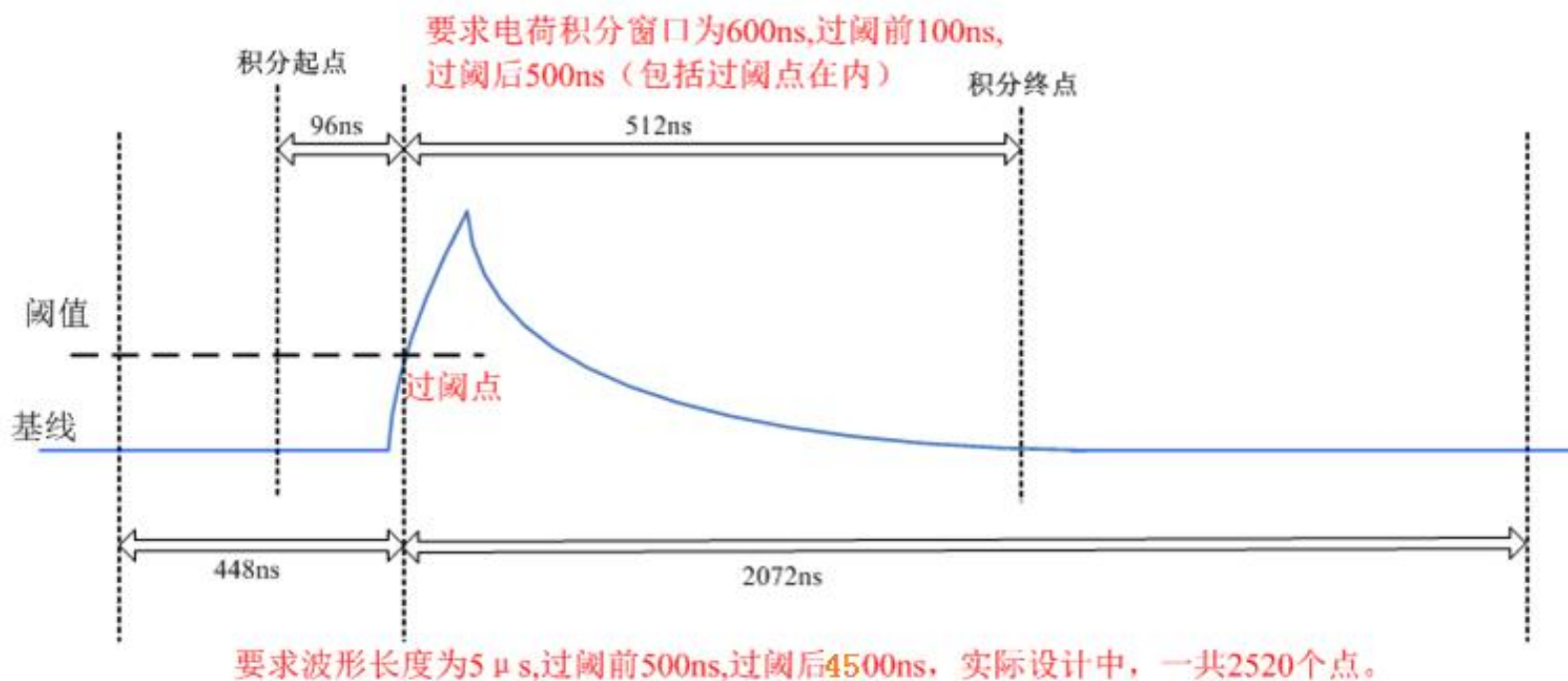
- 基于高速ADC波形数字化方案





# MD电子学设计

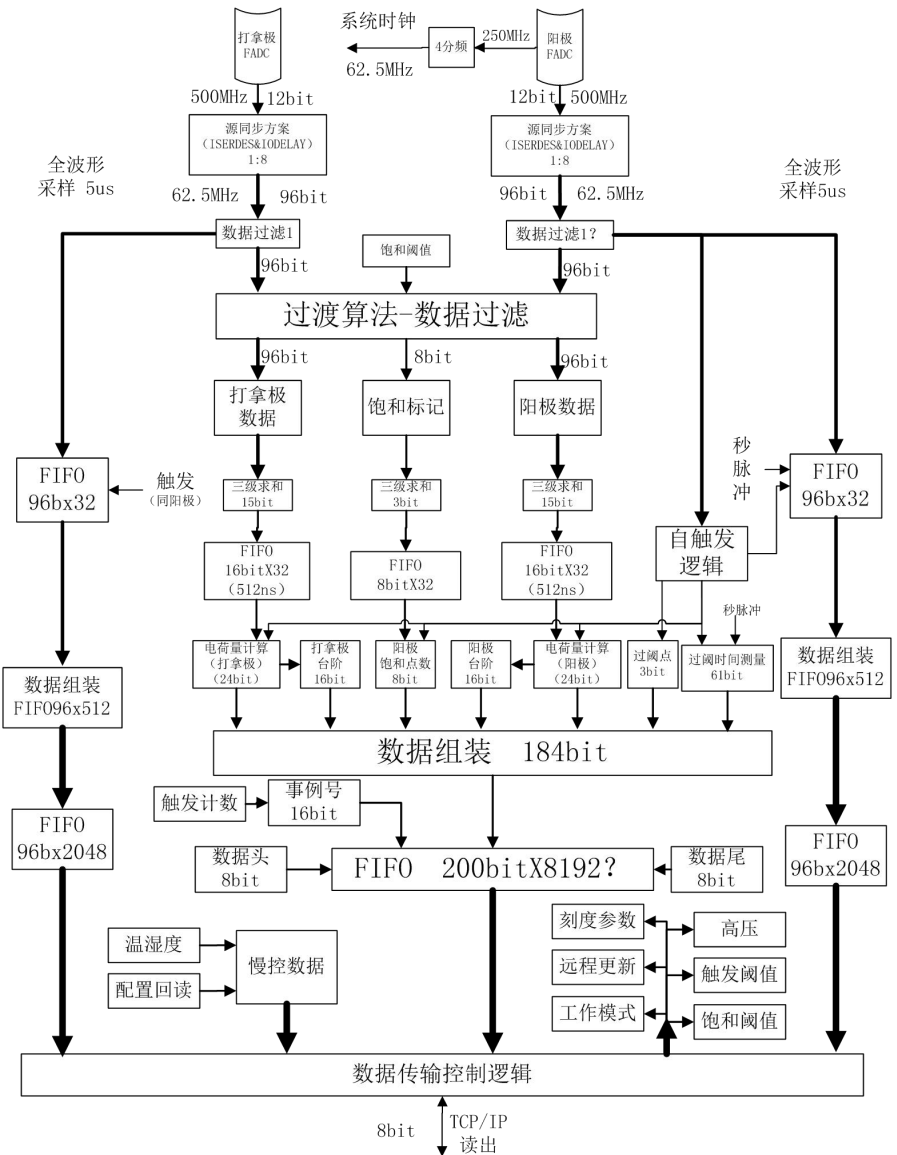
- 数值积分
- 数字阈值 + 前沿定时





# MD电子学设计

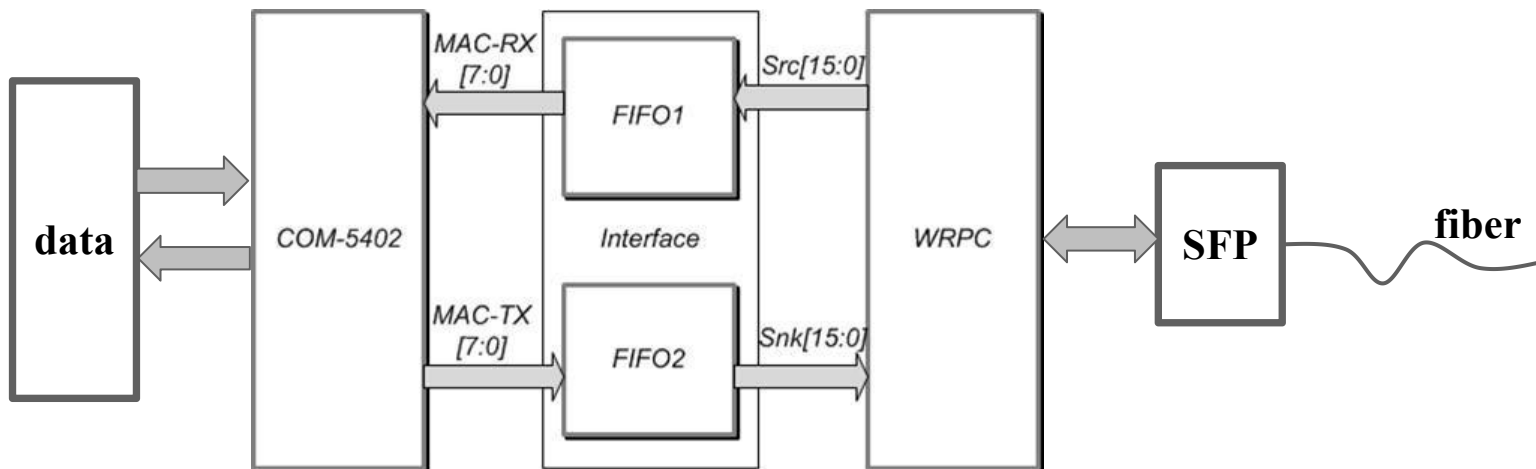
- 采用多级流水线模式进行组装与传输
- 上行数据包含：
  - 事例数据：电荷信息、时间信息
  - 波形数据：阳极，打拿级波形
  - 慢控数据：探测器温湿度、电子学温度、高压工作状态等
  - **定时读出模式**，定时间隔可配置
- 下行数据包含：指令、更新文件
- 平均传输带宽需求  
 $10\text{kHz} \times 376\text{bits/s} = 3.76\text{Mbits/s}$





# KM2A电子学设计

## ■ TCP/IP协议栈 + WRPC核



- 最大数据传输率：  
**320Mbits/s**

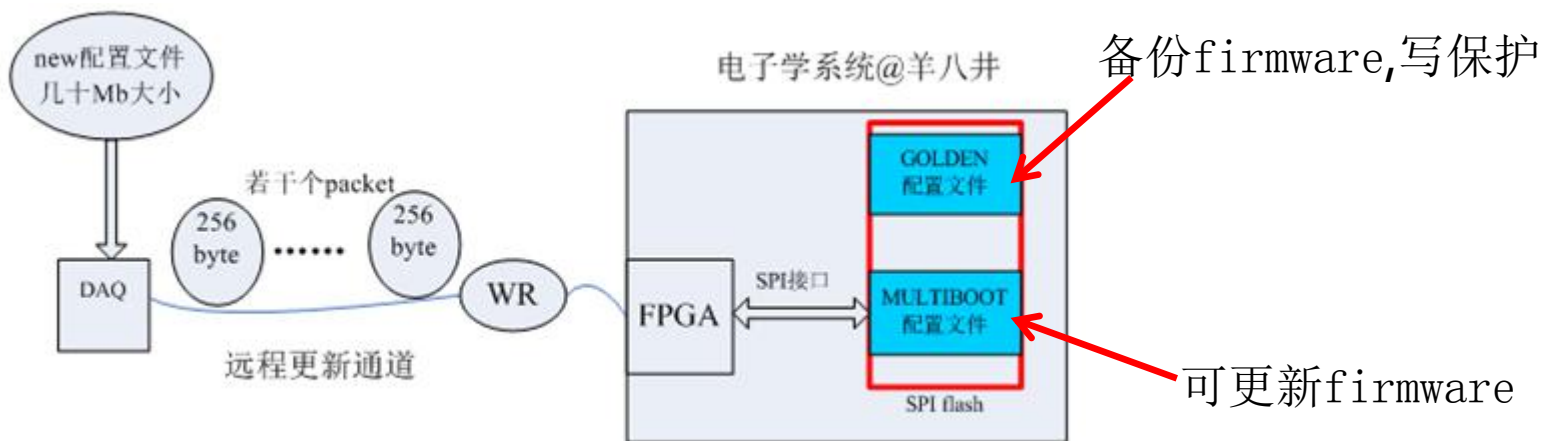
```
cmd "C:\Documents and Settings\user\桌面\测试TCP吞吐量\client\Debug\myrpciet... - _ _ x
*****
5402 client program start
*****
connected!
The start was: 3015
The end was: 3062
The total receive data in Byte: 1893592 Byte
The time was: 47 ms
The speech was: 320 Mb/s
Press any key to continue
```





# KM2A电子学设计

- 基于TCP/IP的Multiboot远程更新方案
  - 无需附加电路实现远程更新
  - 保证更新的可靠性

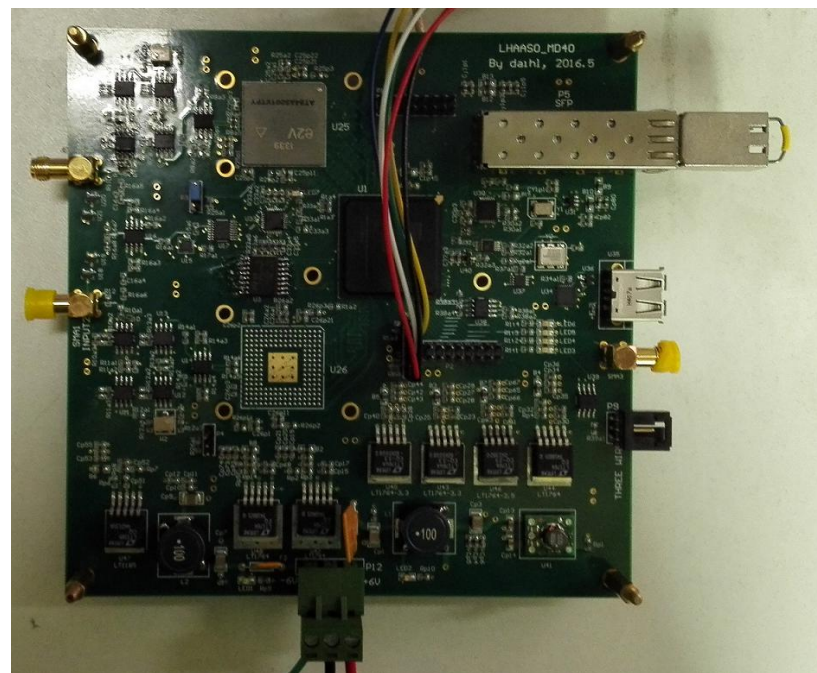




# KM2A电子学设计



ED电子学样机

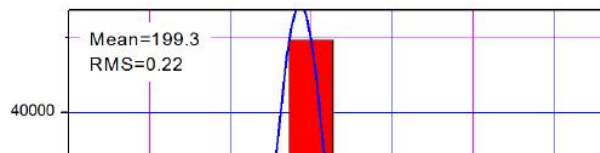
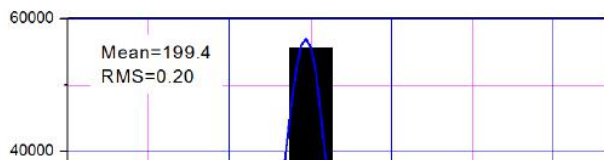


MD电子学样机

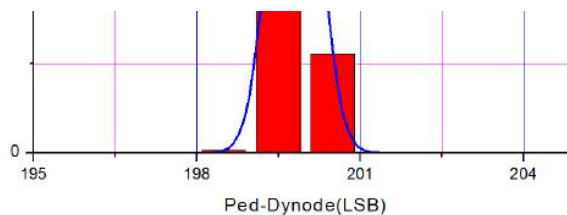
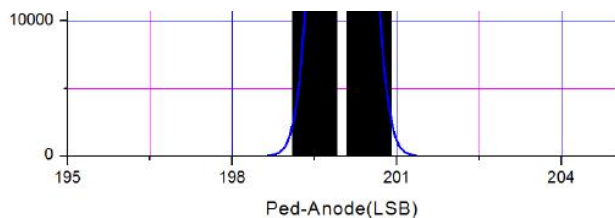
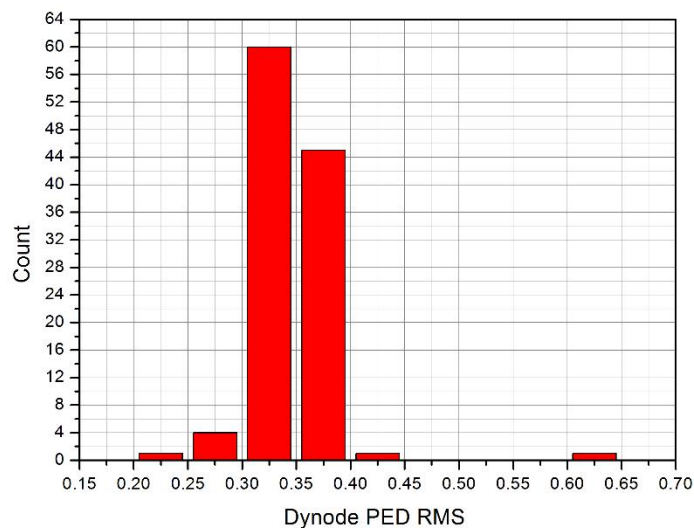
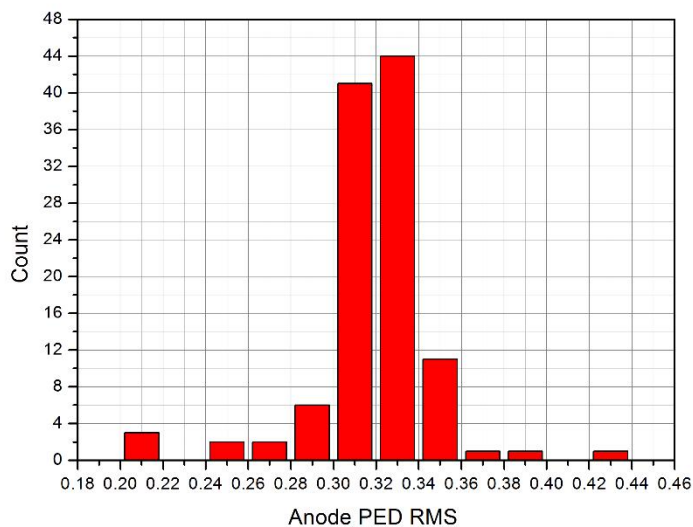


# ED电子学实验室测试

- 台基测试：台基晃动是电子学噪声的直接反映



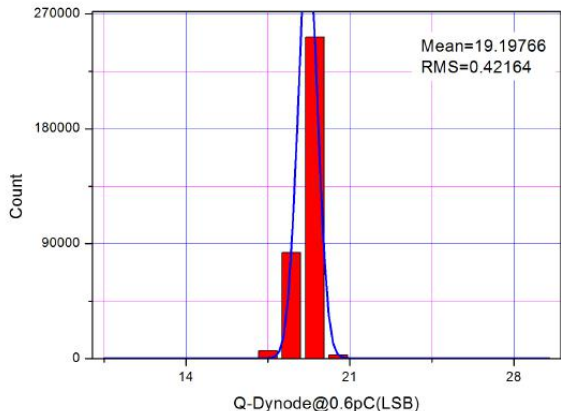
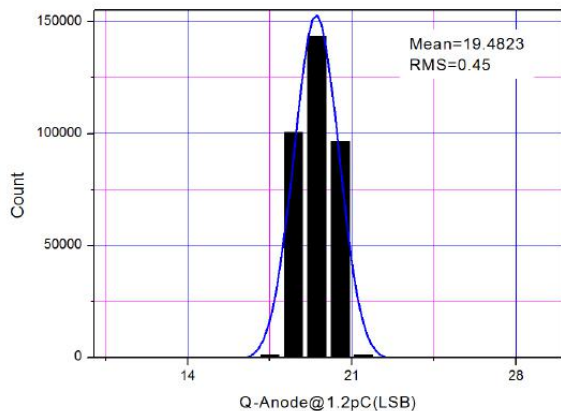
六共



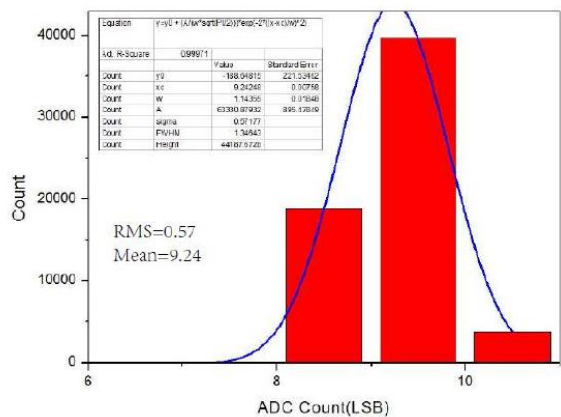
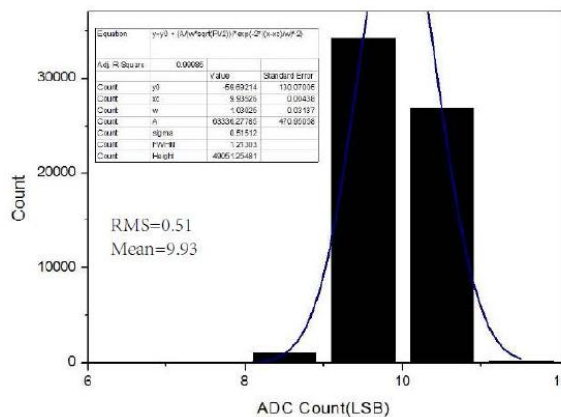


# ED电子学实验室测试

■ 最小信号分辨： $P = \frac{RMS}{Mean}$



PA@1.2pC=2.31%  
PD@0.6pC=2.19%

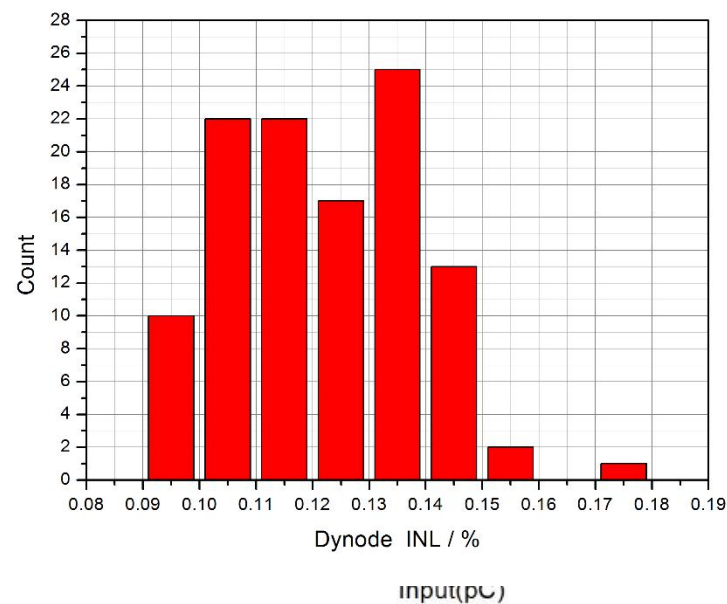
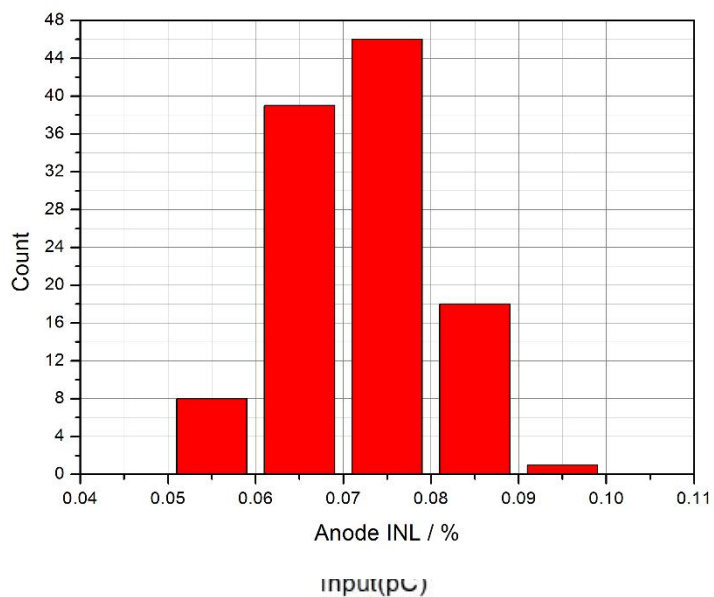


PA@0.6pC=5.1%  
PD@0.3pC=6%



# ED电子学实验室测试

## ■ 积分非线性测试 $INL_i = \frac{y_i - Y_i}{Y}$



增益比为1.9:1

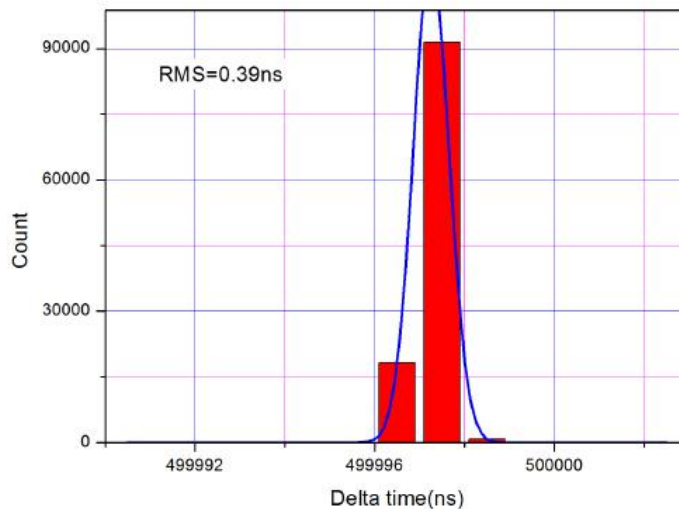
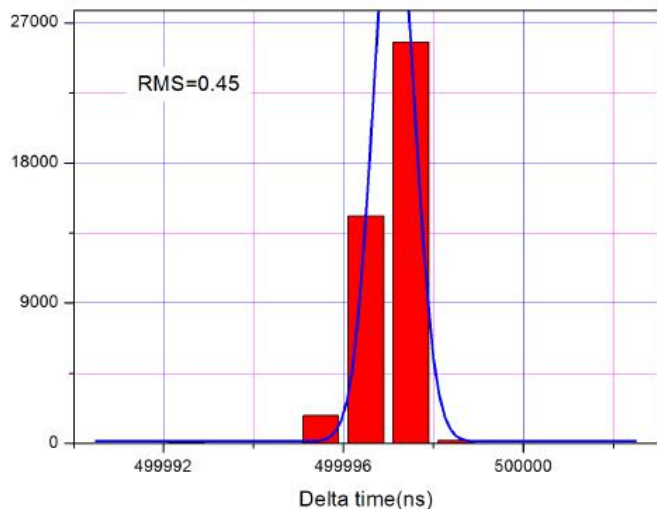


# ED电子学实验室测试

## ■ 时间测量

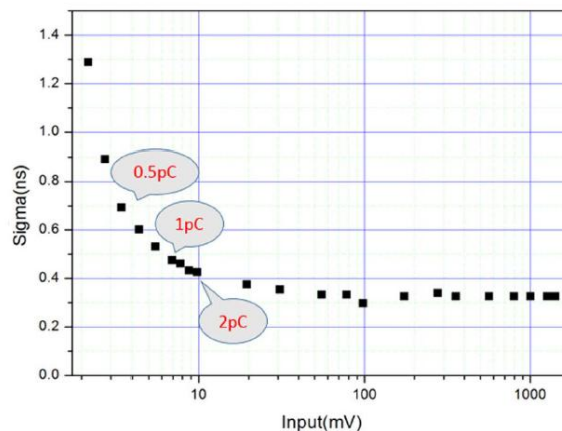
最小信号:  $0.45/1.414=0.31\text{ns}$

最大信号:  $0.39/1.414=0.27\text{ns}$



测试PMT信号时，阈值一定，大信号的测量精度好于小信号，最小信号1.28pC时精度为0.5ns，信号越大，精度最终趋近于标准信号时间测量精度。

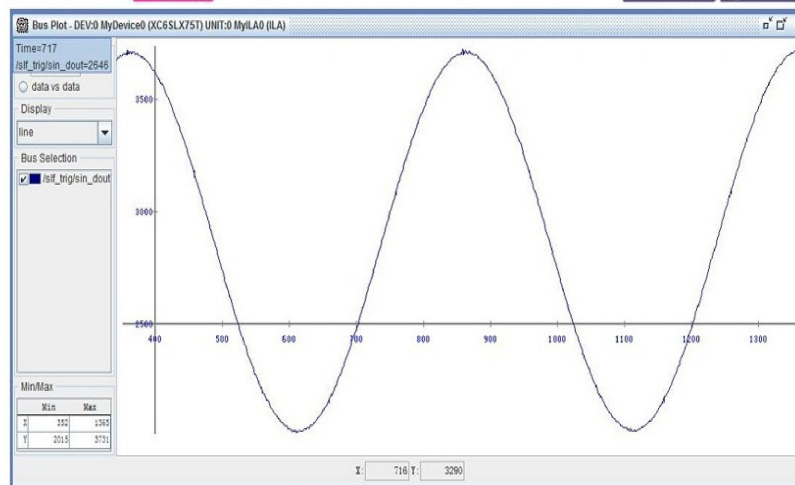
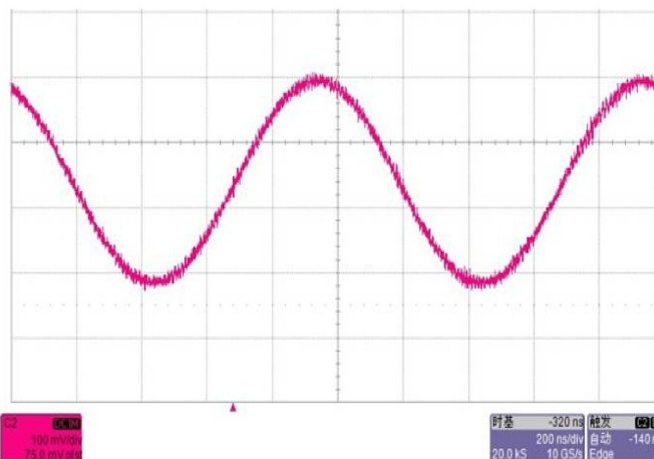
样机时间测量精度一致性较好。





# MD电子学实验室测试

## ■ 波形重建

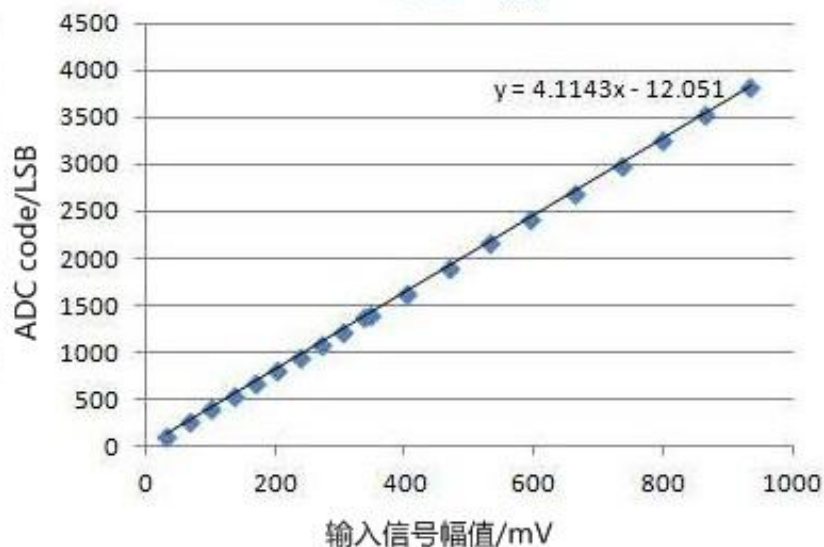




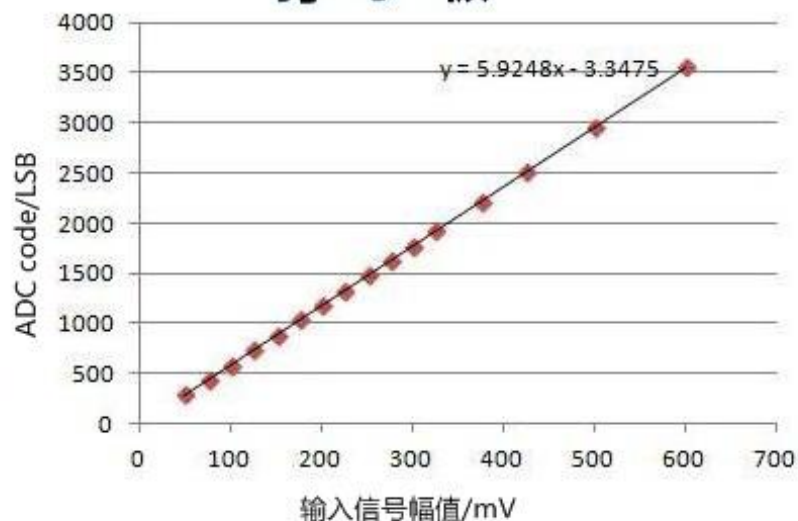
# MD电子学实验室测试

## ■ 增益测试

### 阳极



### 打拿极



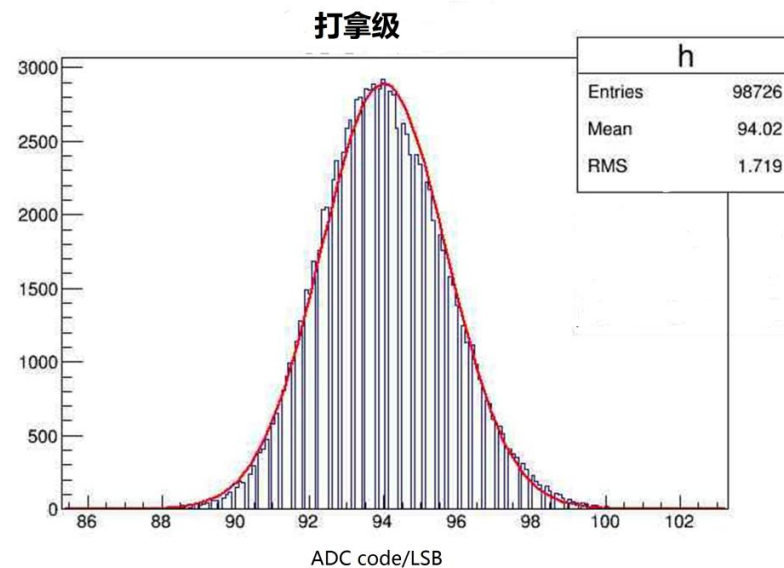
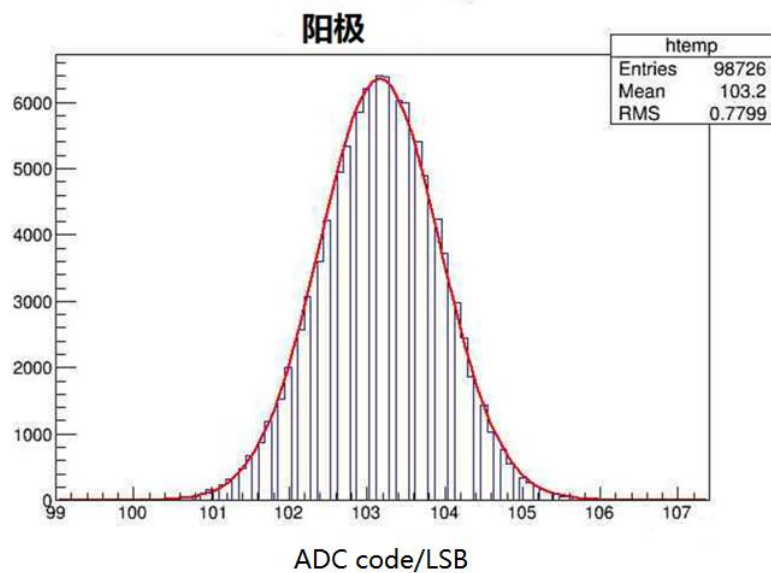
阳极增益约4LSB/mV，打拿级增益约6LSB/mV，跟设计一致





# MD电子学实验室测试

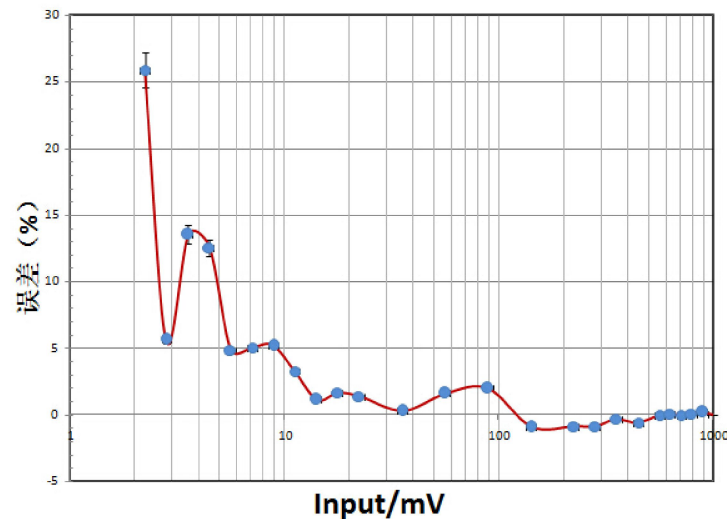
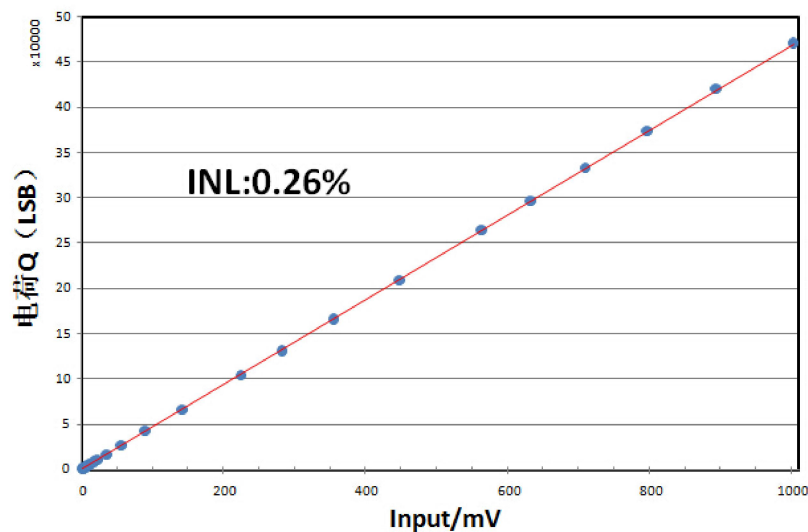
## ■ 台基测试





# MD电子学实验室测试

## ■ 电荷积分非线性测试：数值积分法



单光电子信号幅度约4mV, 误差约14%; 信号大于10mV时, 误差好于2%。



# ED电子学温度稳定性测试

## ■ 低温冷启动测试：

- 对于固定的输入信号，电子学在-35°C环境中上电，测量输出幅值随上电时间变化。

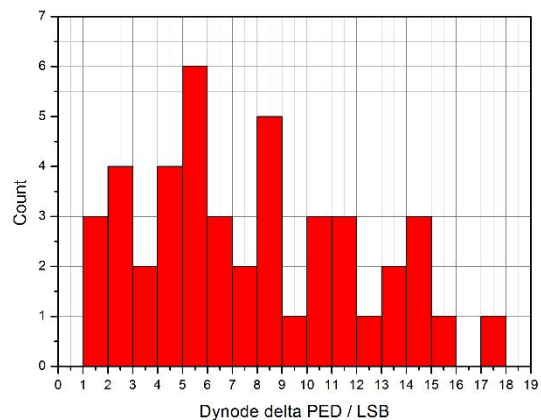
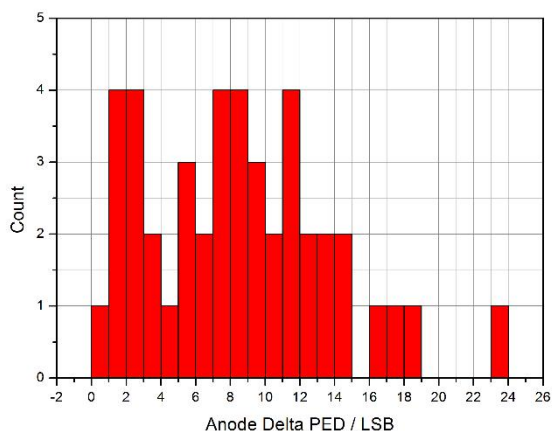
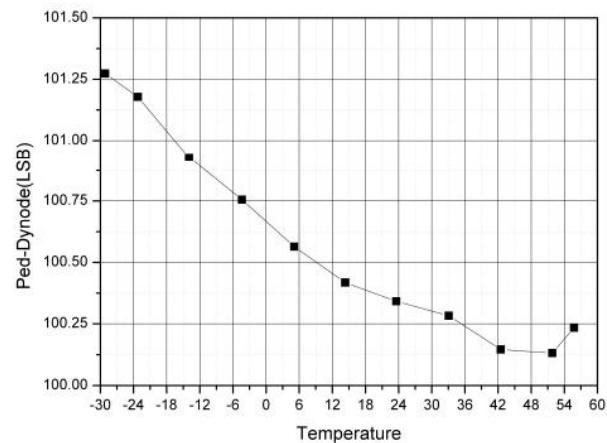
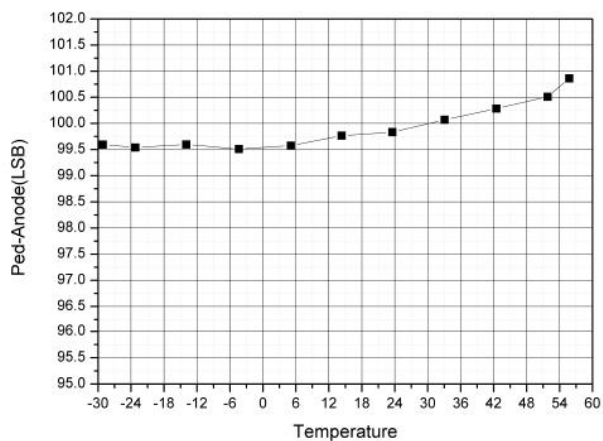
	上电20秒	上电5分钟
Anode(Mean)	2549.56	2550.24
Anode(RMS)	0.62	0.72
Dynode(Mean)	2459.12	2459.46
Dynode(RMS)	0.88	0.77

电子学在-35°C环境中上电即能稳定工作。



# ED电子学温度稳定性测试

## ■ 台基温度稳定性:

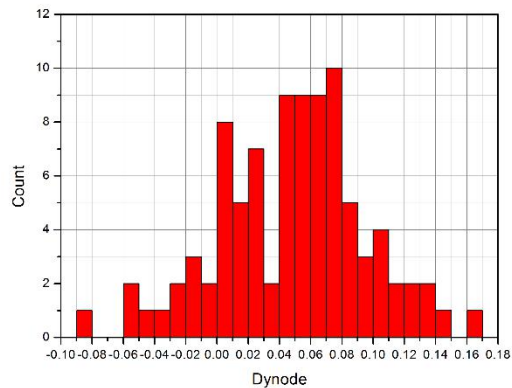
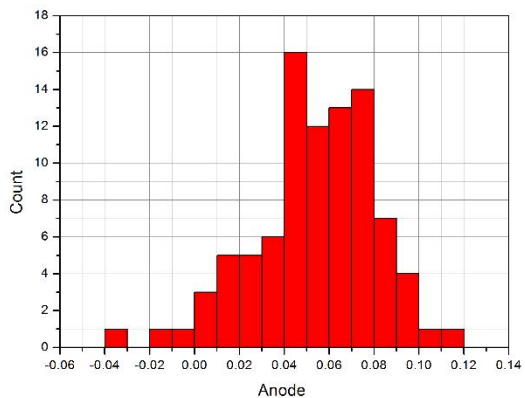
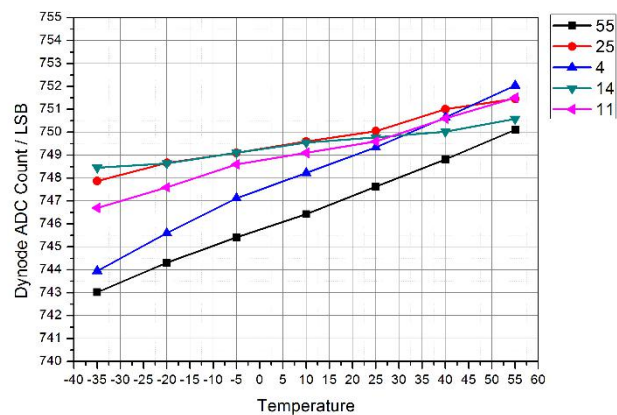
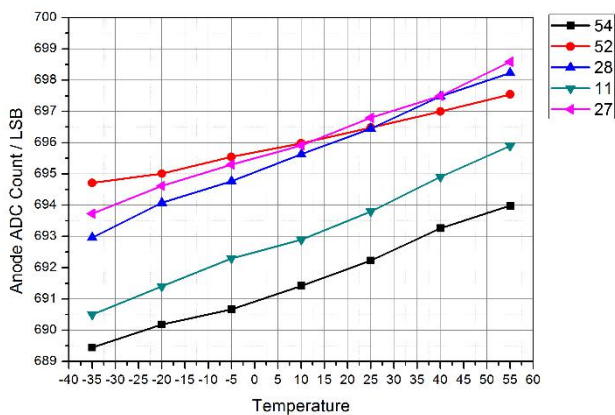


Delta PED = Max - Min



# ED电子学温度稳定性测试

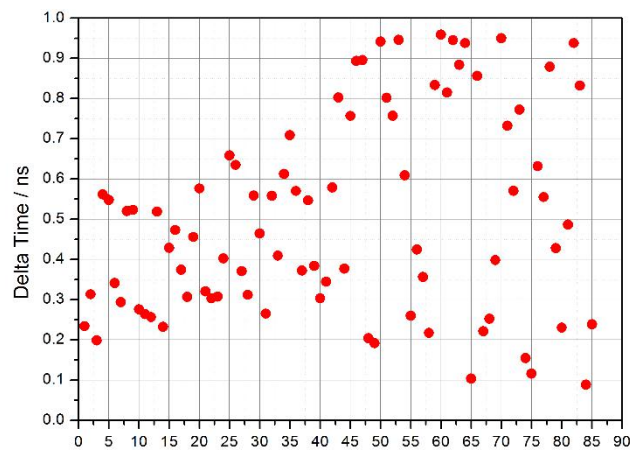
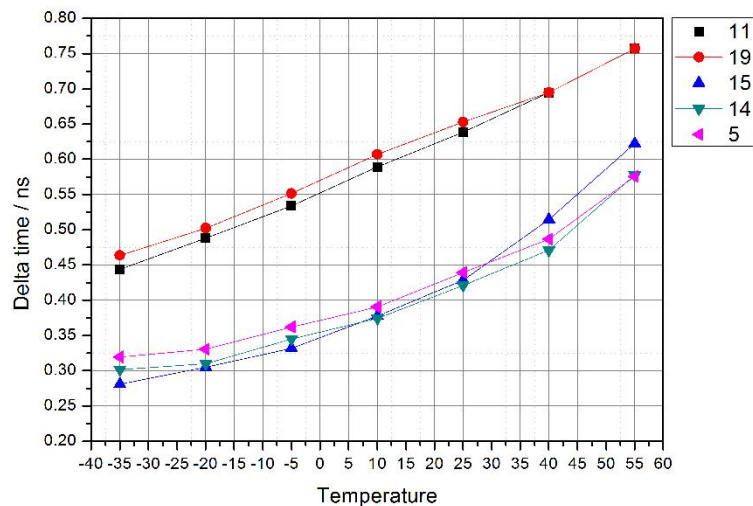
## ■ 增益稳定性





# ED电子学温度稳定性测试

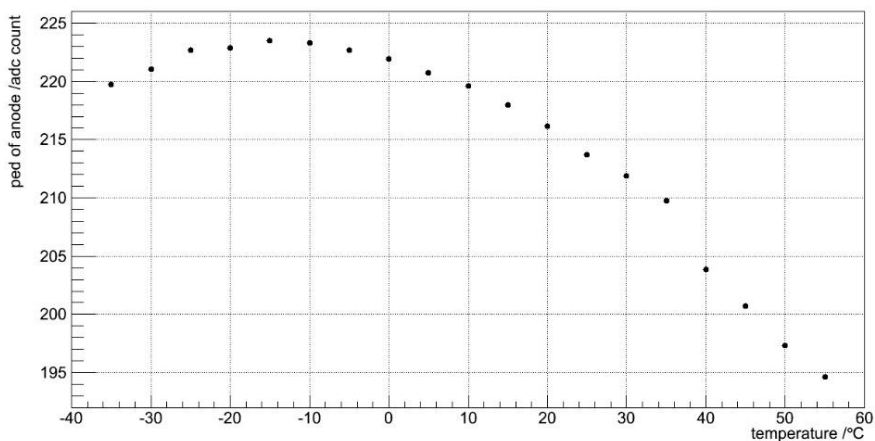
## ■ 时间测量稳定性



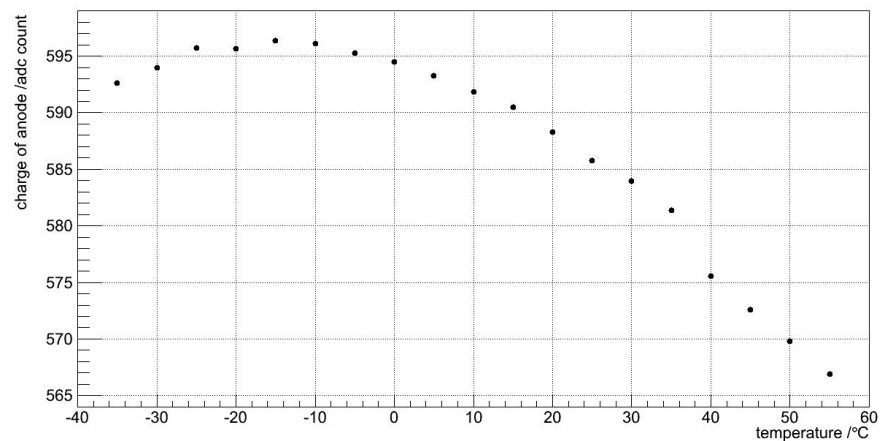
- 时间的温度系数均为正值，平均值5.61ps/ °C
- 最大值10.65ps/ °C，最小值0.98ps/ °C
- 温度系数最大最小两块板在某温度点对齐后，变化10 °C，时间差为96.7ps



# MD电子学温度稳定性测试

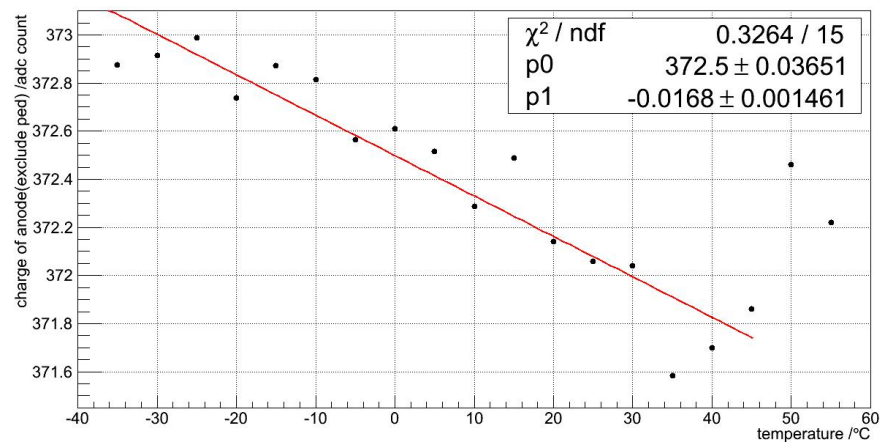


台基随温度变化



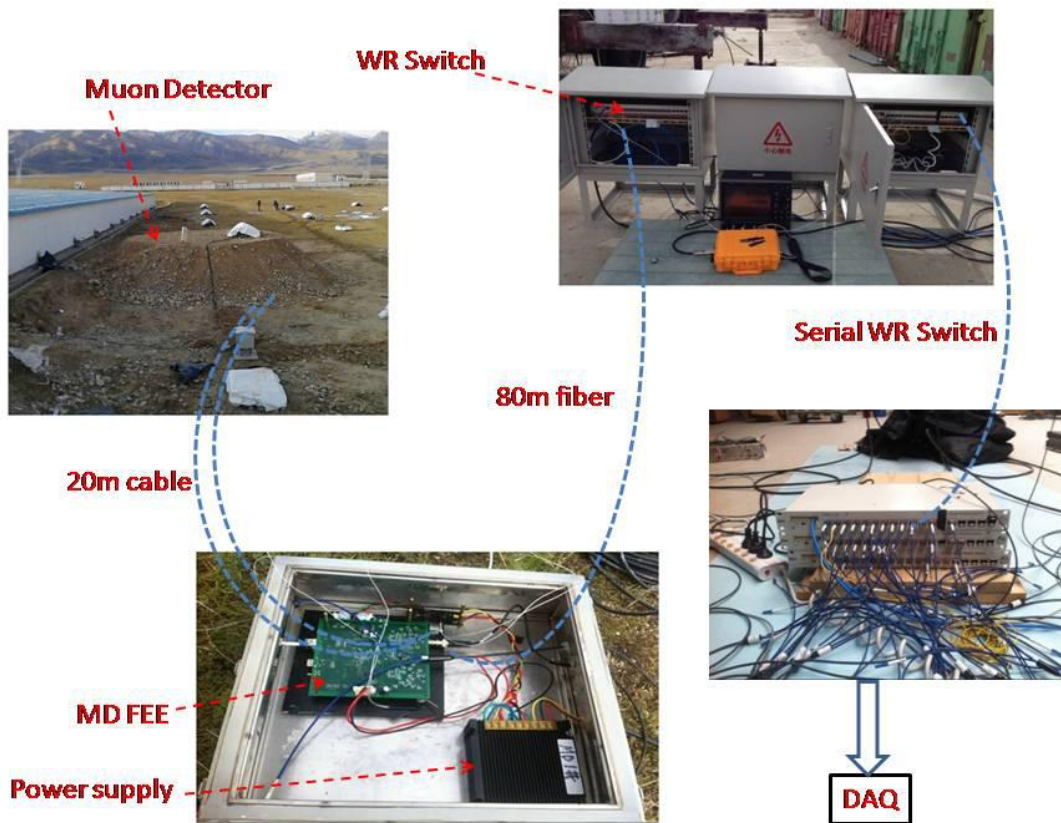
电荷随温度变化

- 台阶: 1‰
- Q (包括台阶) : 1‰
- Q (扣除台阶) : ~0.05‰





# 工程样机阵列测试结果

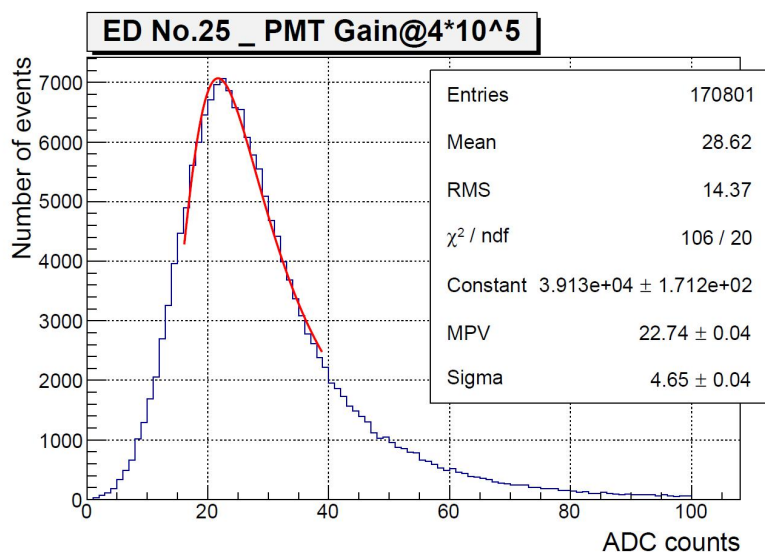




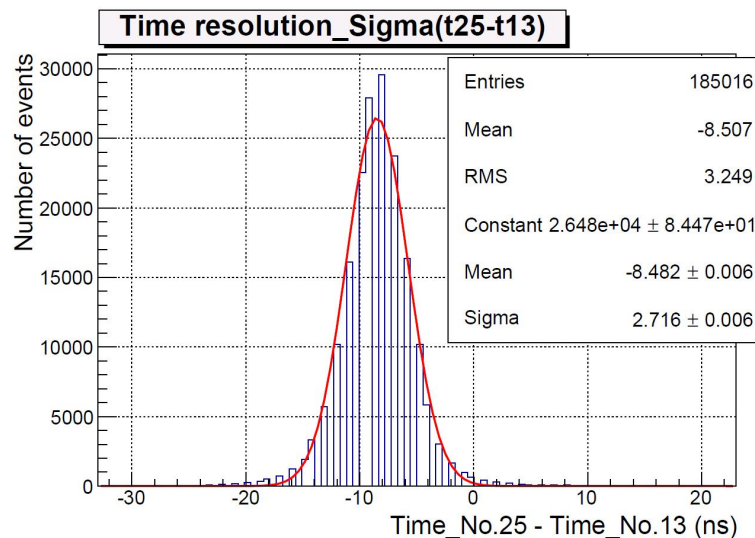


# 工程样机阵列测试结果

## ED样机阵列测试结果



探测器联合测试能量分辨  
@ $1\mu = 4.65/28.62 = 16.2\%$  (<25%)

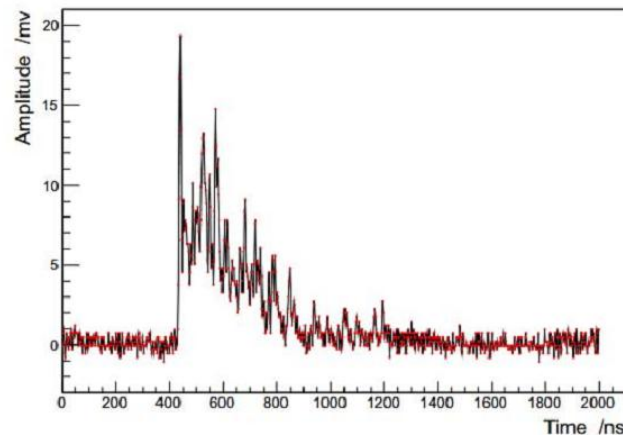


双探测器时间分辨sigma=2.71ns  
单探测器时间分辨  
Sigma $\approx 2.71/1.41 \approx 1.9\text{ns}$  (<2ns)

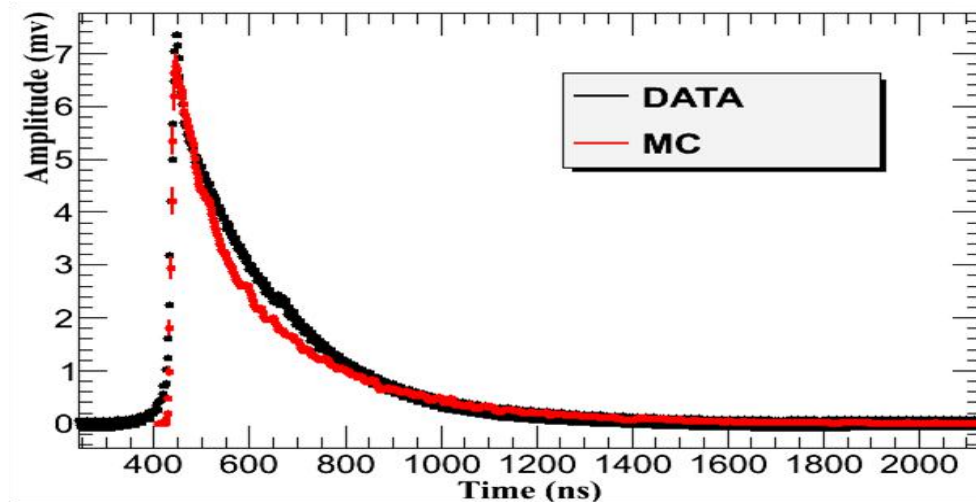


# 工程样机阵列测试结果

- MD样机测试结果
  - 样机阳极信号重建



阳极信号波形

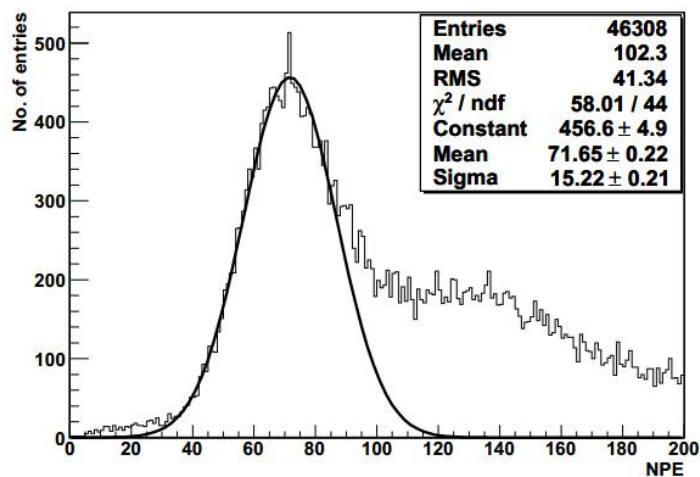


4000个阳极信号做平均

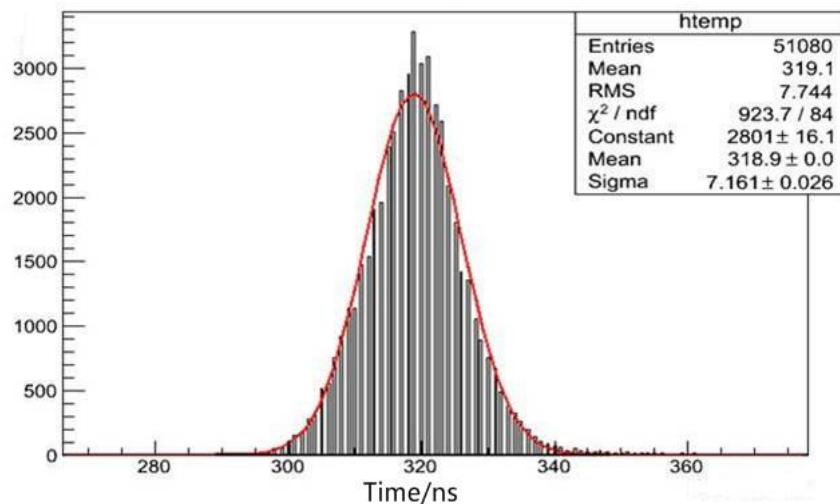


# 工程样机阵列测试结果

## ■ MD样机阵列测试结果



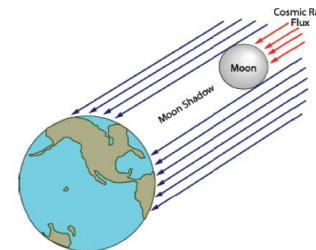
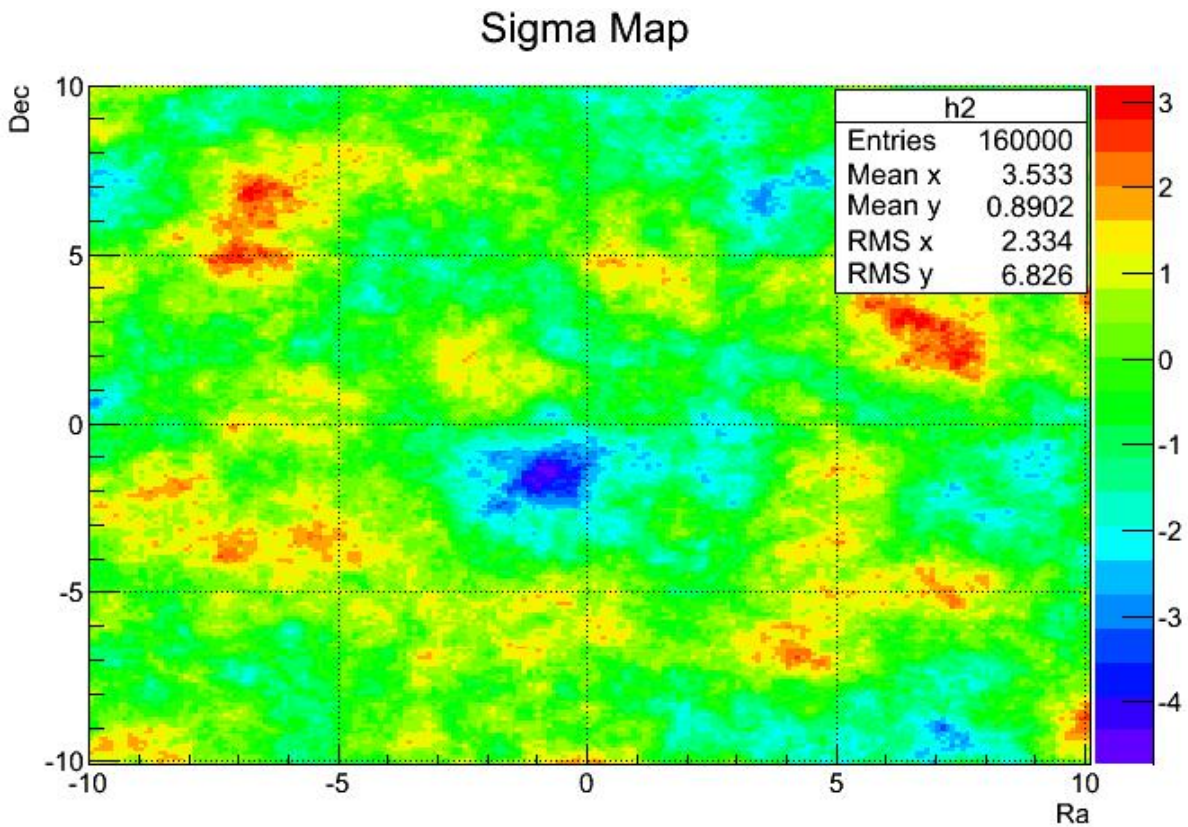
单缪电荷分辨约21.2% , (<25%)



时间分辨约7.2ns, (<10ns)



# 工程样机阵列测试结果



利用1年数据看到了4.7倍的显著性，基本符合预期。



**谢谢！**