

质子束--触发系统FLASH

研制进展

报告人：钱森，马丽双

qians@ihep.ac.cn

报告时间：20231019

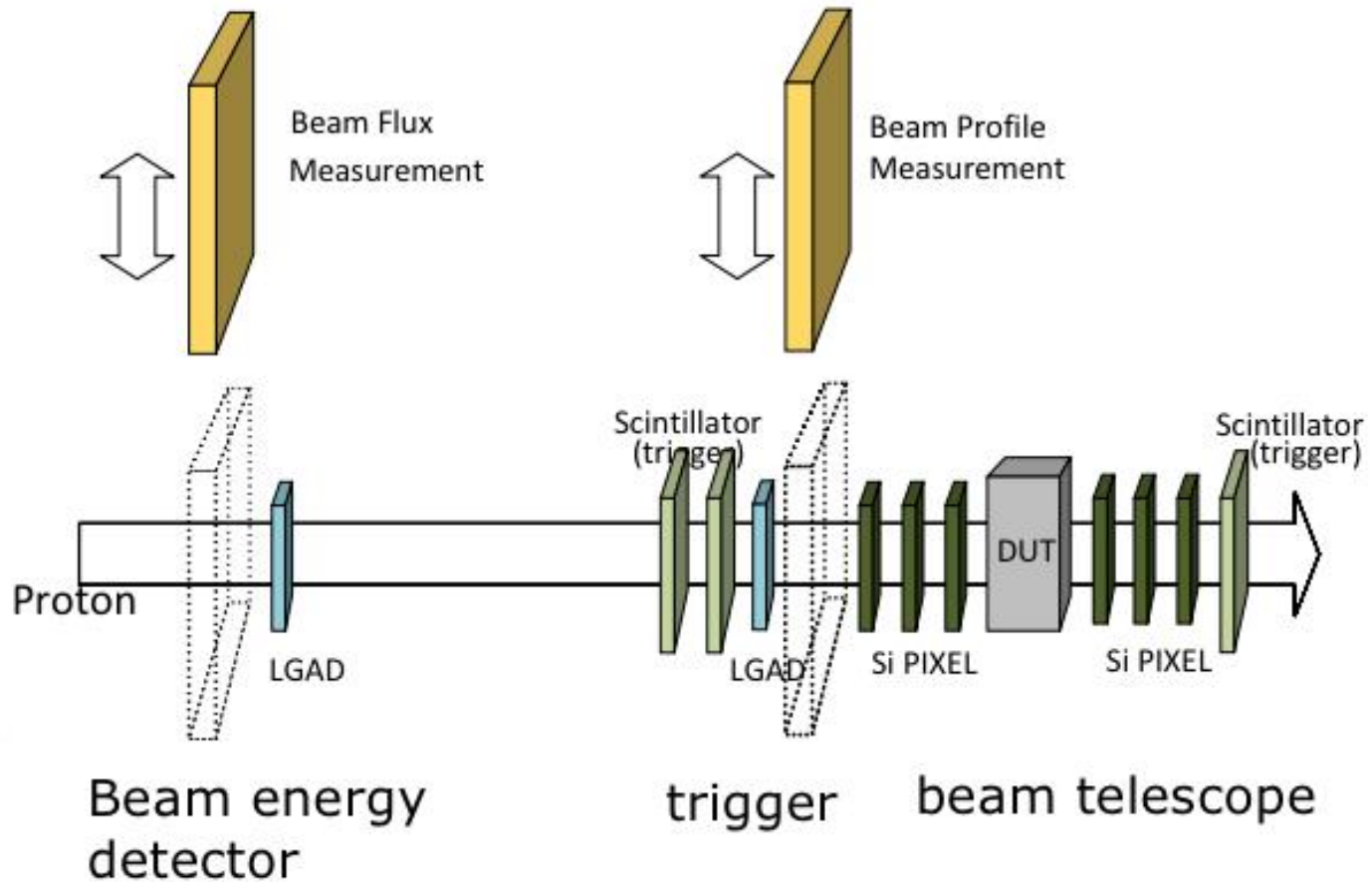
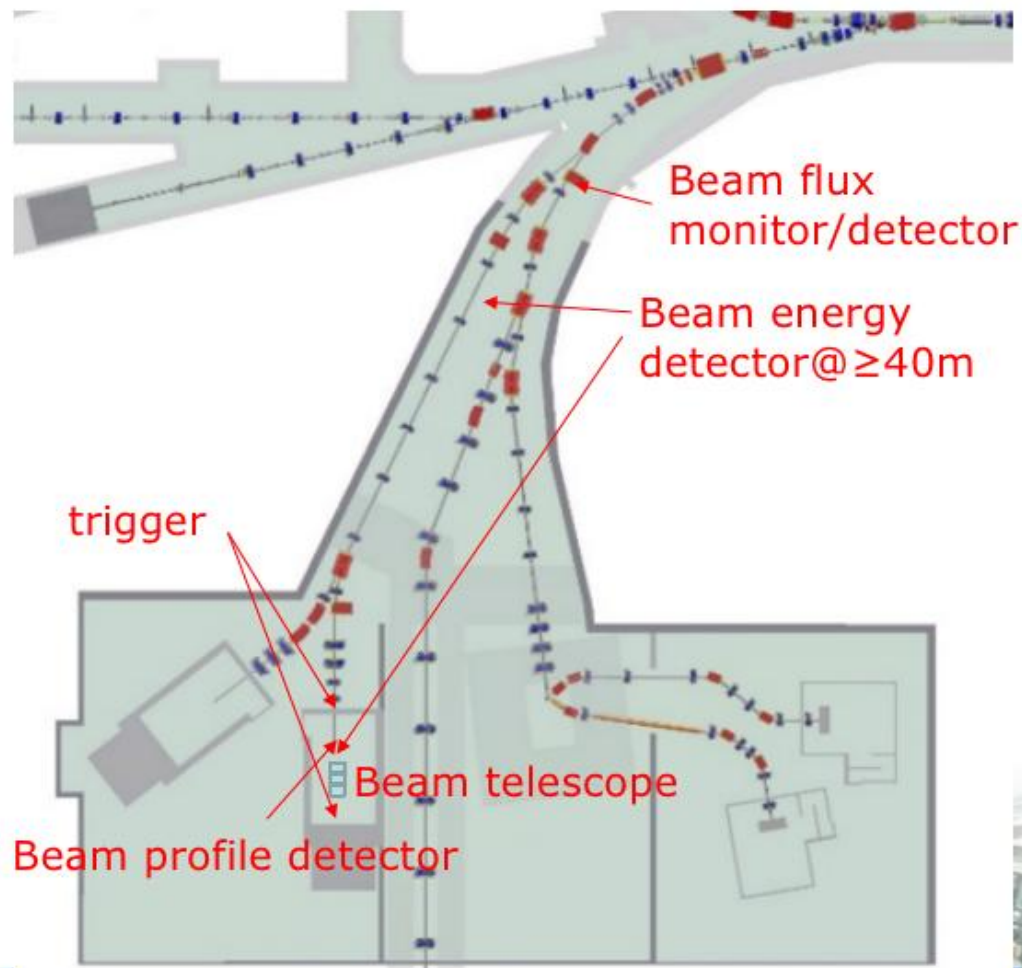


提纲

- 1. 背景需求;
- 2. 触发系统探测器设计;
- 3. 探测器方案预研进展;
- 4. 电子学方案进展;
- 5. 下一步计划;



1.0 背景需求-----质子束探测器



1.1 触发系统FLASH

触发探测器

触发探测器可以分为:

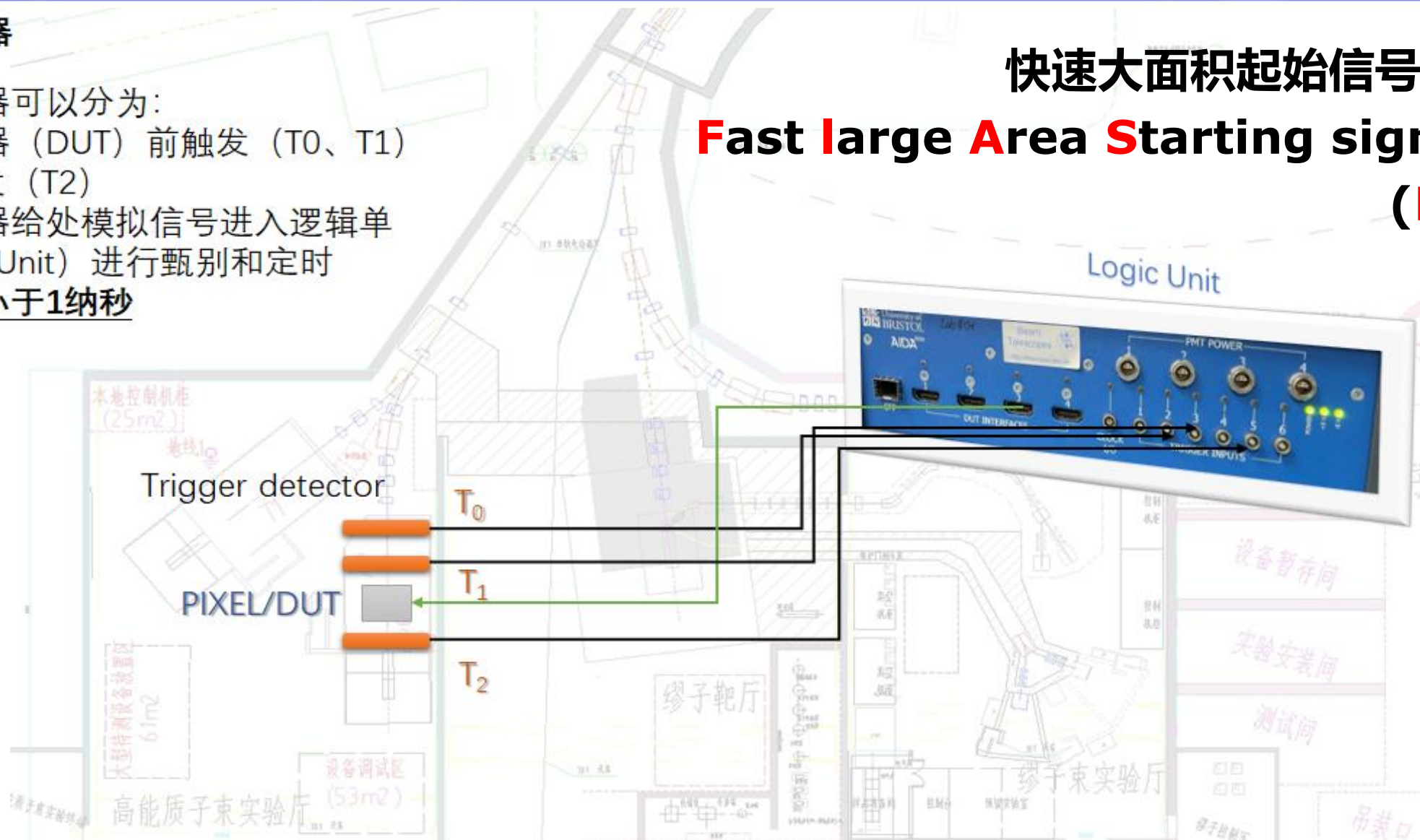
待测探测器 (DUT) 前触发 (T0、T1)

DUT后触发 (T2)

所有探测器给出模拟信号进入逻辑单元 (Logic Unit) 进行甄别和定时

时间分辨小于1纳秒

快速大面积起始信号分发器,
Fast large Area Starting signal Hub
(FLASH)



1.2 触发系统FLASH参数表

参数类型	参数名称	参数值
探测器设计参数	计数率上限	10kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	探测器数量	3组
	电子学通道	2CH X 3组
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	触发系统符合时间分辨	<1ns
	光电倍增管单光子时间分辨	< 100ps

2.0 FLASH探测器设计基本原理



- 闪烁晶体
 - 塑料闪烁体
 - 塑料闪烁光纤
 - 晶体闪烁光纤
 - 闪烁玻璃
 - 闪烁玻璃光纤
- PMT
 - SiPM
 - APD
 - ...
- FADC
 - TDC
 - ...



2.1 FLASH探测器关键核心部件----闪烁材料

闪烁体种类	优点	缺点
塑料闪烁体 	光产额相对较高，成本较低，衰减时间快 、可定制形状，不易潮解，耐辐照	能量分辨率较差，密度较低，机械强度较低
闪烁晶体	光产额高、能量分辨率好，衰减时间快	研制成本高 、抗辐照特性差、抗辐照特性较差、部分晶体易潮解
闪烁玻璃	制备工艺简单、成本较低、成分可调、可定制	光产额相对低 、衰减时间较长

闪烁光纤种类	优点	缺点
塑料闪烁光纤	光产额高，已经作为一种成熟的辐射传感单元被应用于闪烁光纤辐射探测器的设计研发	塑料闪烁光纤 密度低，抗辐射能力差，使用寿命短 ；熔点较低，无法在高温环境下应用；单丝直径过大，空间分辨率低
晶体闪烁光纤	具有对辐射线性响应好、尺寸小、抗辐射能力强、耐高温等优点	晶体闪烁光纤在制备过程中对设备、环境的要求较高；晶体生长与光纤的拉制非常耗时， 大批量生产难度大，制作成本非常高
闪烁玻璃光纤 	制备工艺简单、成本低廉 、可短时间内生产大尺寸产品； 成分和性能连续可调 ，可根据不同应用需求来制备不同的产品	相关研究工作大多集中在X射线激发下的性能测试，以及 X射线成像领域



2.1 FLASH探测器关键核心部件----闪烁材料 (1) ----闪烁光纤

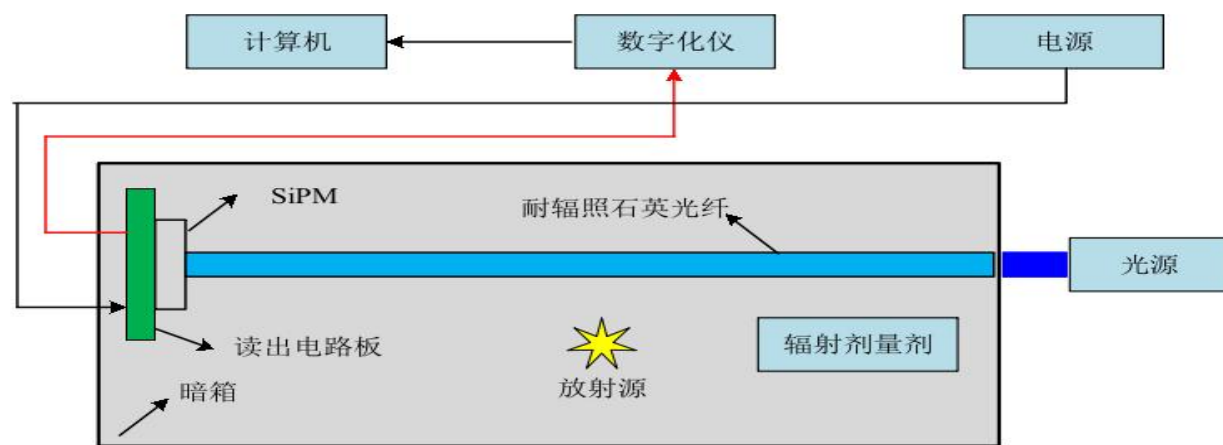
硅酸盐石英光纤+稀土掺杂 (Ti^{4+} 和 Ce^{3+}) =耐辐照闪烁玻璃光纤



----研究表明稀土掺杂有源光纤在面临相同条件高能射线和粒子(如质子、电子、X和 γ 射线等)辐射下, 其辐射诱导损耗比非稀土掺杂的无源光纤大1000倍以上。

----哈尔滨工程大学, 纤维集成光学实验室, 具有成熟的耐辐照光纤加工测试技术。

----光纤长度超过100m, 光纤芯直径为 $12.5\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$, 在辐照剂量 $\geq 500\ \text{Gy}$ 条件下, 作为耐辐射光纤进行应用。



2.2 FLASH探测器关键核心部件-----光电器件

光电器件种类	优点	缺点
 <p>PMT</p>	<ul style="list-style-type: none">• 高增益• 低暗噪声• 快响应时间• 抗辐照能力强	<ul style="list-style-type: none">• 高工作电压• 对磁场敏感• 抗震性不好
 <p>SiPM</p>	<ul style="list-style-type: none">• 高增益• 高量子效率• 快响应时间• 工作电压较低• 对磁场不敏感;	<ul style="list-style-type: none">• 较高暗噪声计数率• 对温度敏感• 抗辐照能力差

2.2 FLASH探测器关键核心部件----光电器件 (1) ----FPMT

进口Photek210 与 国产单阳极FPMT

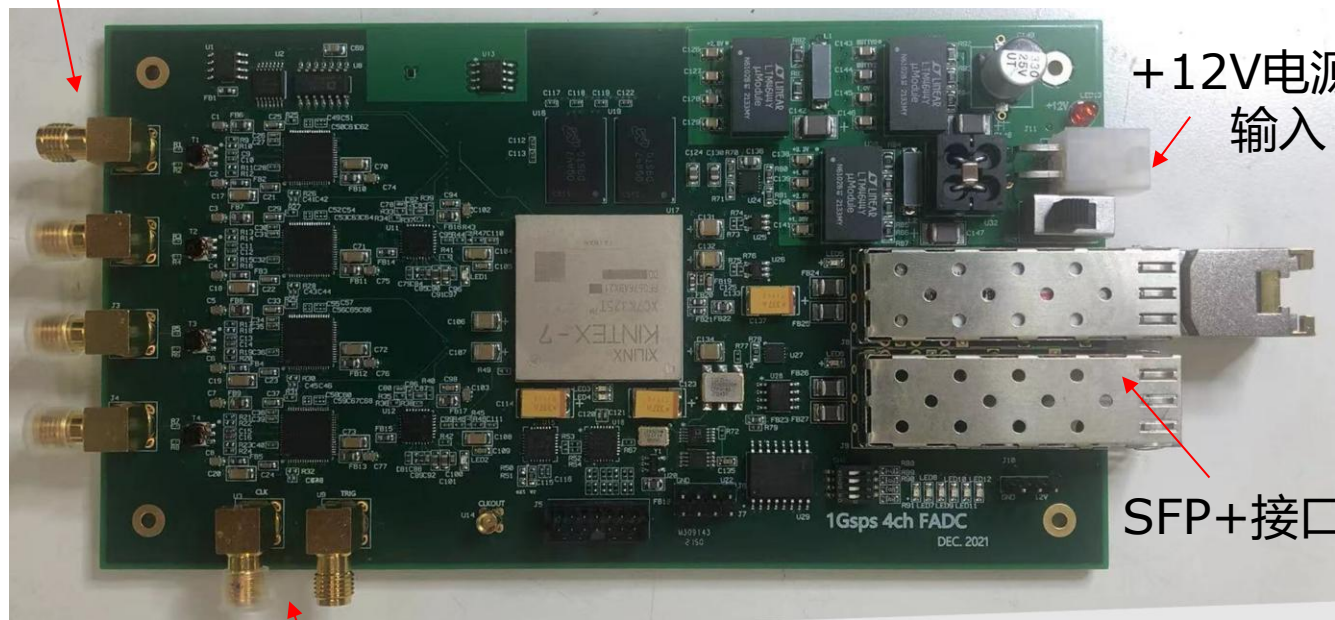


	HV/V	gain	P/V	幅度(SPE)	TTS @SPE	TTS @MPE
Photek 210	-4700	2.9E6	2.0	93.2mV	43.5ps	10.3ps
国产NNVT-1	-2750	2.8E6	6.3	44.2mV	26.6ps	7.4ps
国产NNVT-2	-3176	1.75E6	18.6	35.72mV	30.3ps	8.0ps

2.3 FLASH探测器关键核心部件--电子学读出板-- FADC

JUNO用FADC 数据采集卡++, 给用户提供了探测器波形信号, 供离线分析使用

前端输入接口



+12V电源
输入

SFP+接口

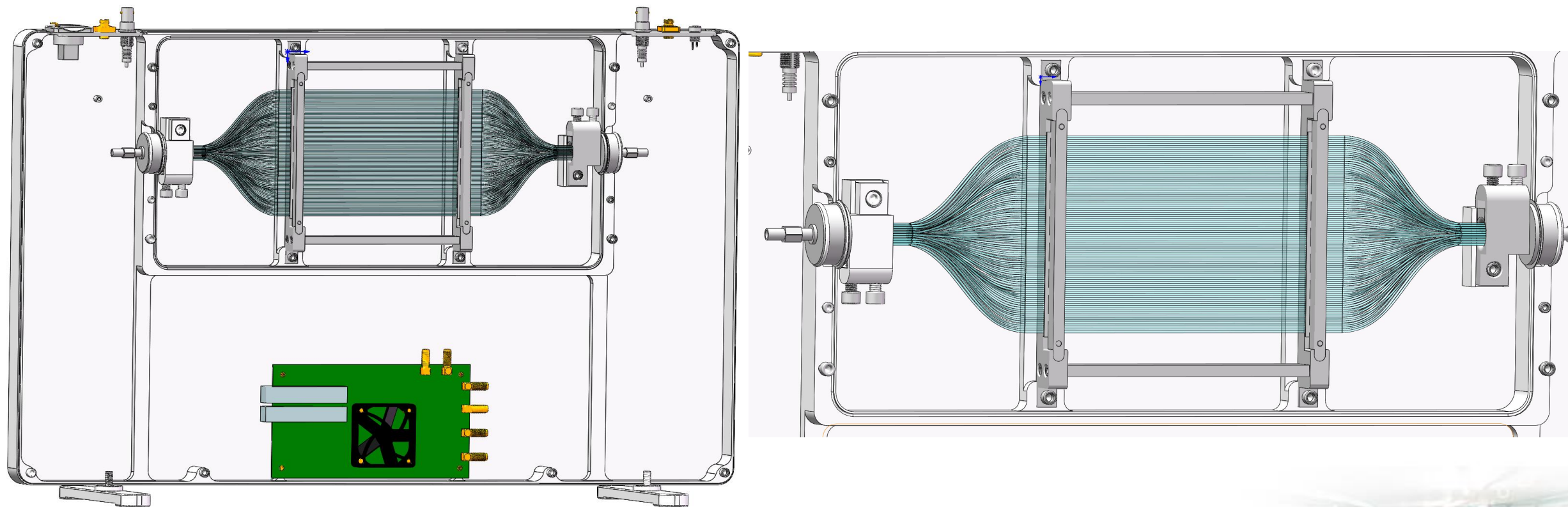
时钟触发接口

性能参数

- 采用国产自研ADC芯片, 模拟带宽300MHz,
- 支持4通道同步采样, 采样率1Gbps,
- 转换精度14bits, ENOB > 9.8bits@100MHz,
- 输入阻抗50欧姆, 交流耦合,
- 支持外部同步时钟及同步触发,
- 支持多种触发方式,
- 板载2GB DDR3内存,
- 2路SFP+接口, 支持网络/光纤读出, 最高连续传输数据率可达13.2Gbps.

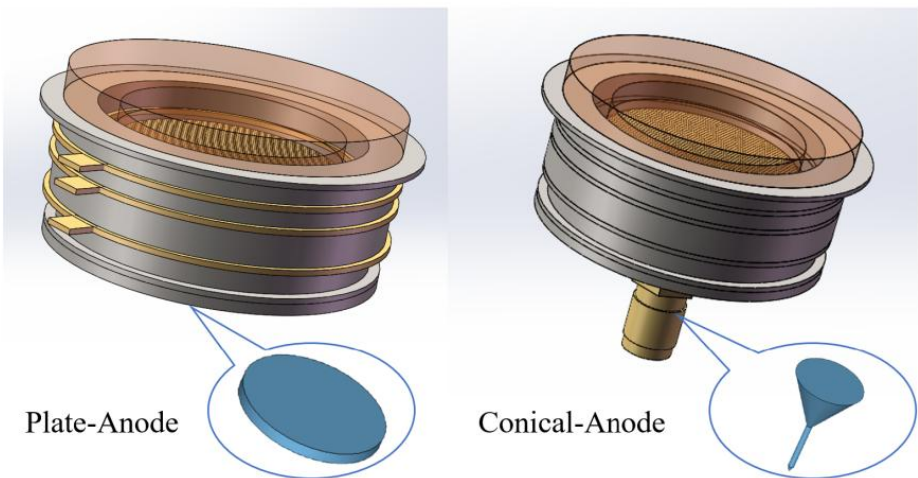
3.0 探测器设计方案 ----FPMT+光纤+FADC方案

方案1: FPMT + 闪烁光纤 + 波形采样板

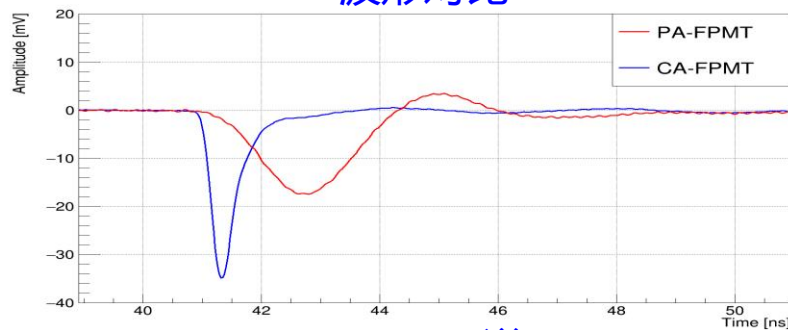


3.1 关键技术----- (1) FPMT

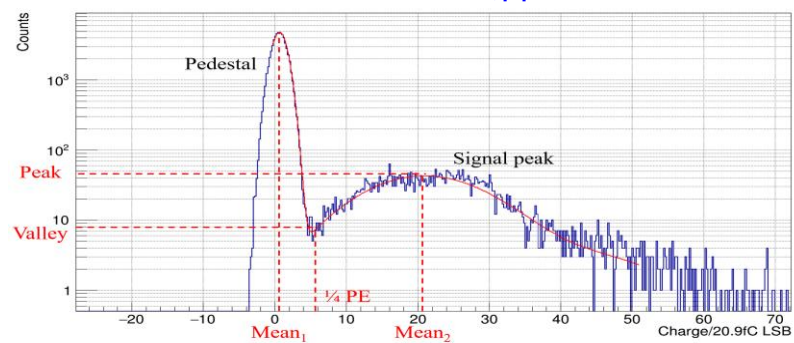
➤ 阳极优化



➤ 波形对比

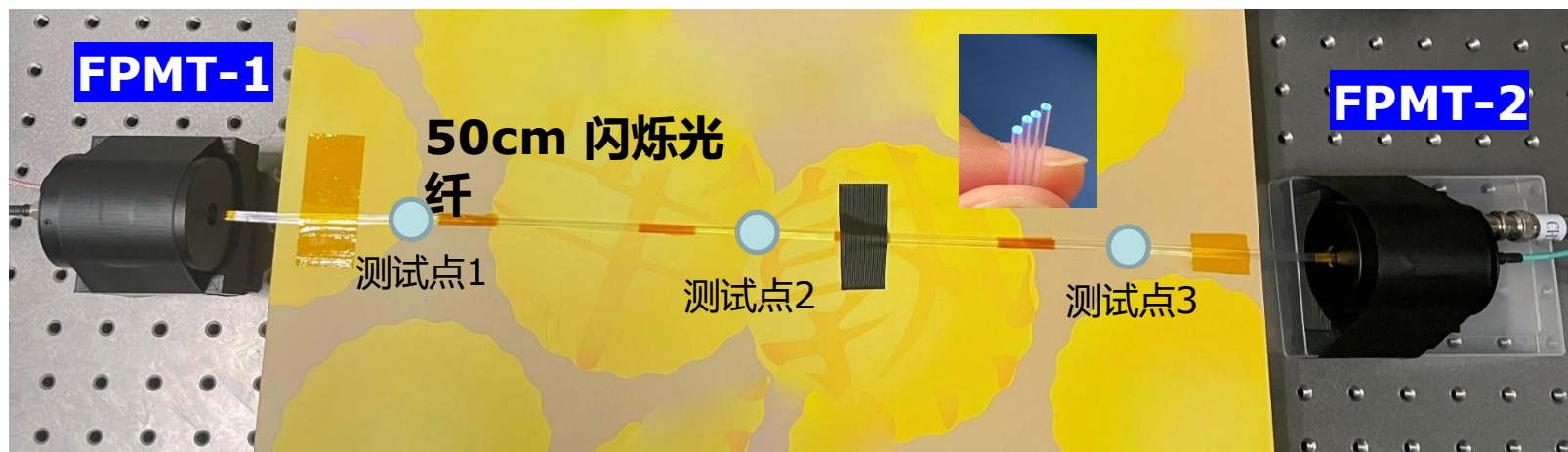


➤ SPE 谱



	HV/V	Gain	P/V	Amp(SPE)	RT	FT	Width	TTS@SPE	TTS@MPE
Photek 210	-4700	2.9E6	2.0	93 mV	96 ps	350 ps	190ps	45 ps	10 ps
Plate-Anode	-2000	1.9E6	28.8	7 mV	1.4 ns	1.4 ns	1.8 ns	70 ps	25 ps
Conical-Anode	-3181	2.6E6	6.3	53 mV	150 ps	420 ps	330 ps	27 ps	5 ps

3.2 关键技术----- (2) FPMT+闪烁光纤



闪烁光纤长度：50cm，端面抛光

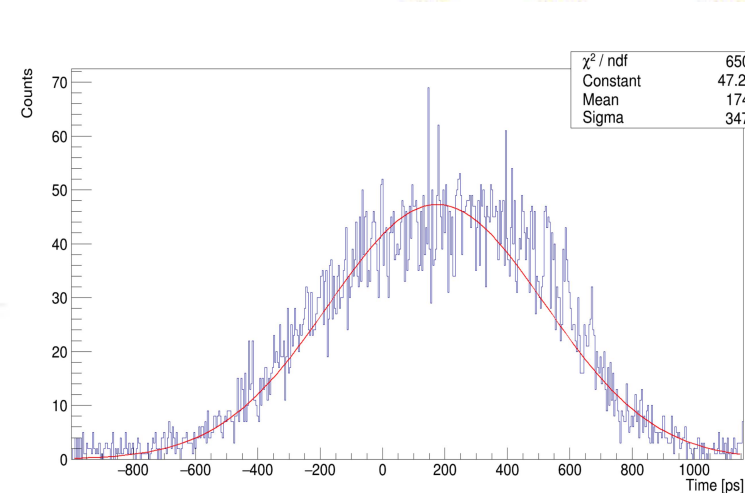
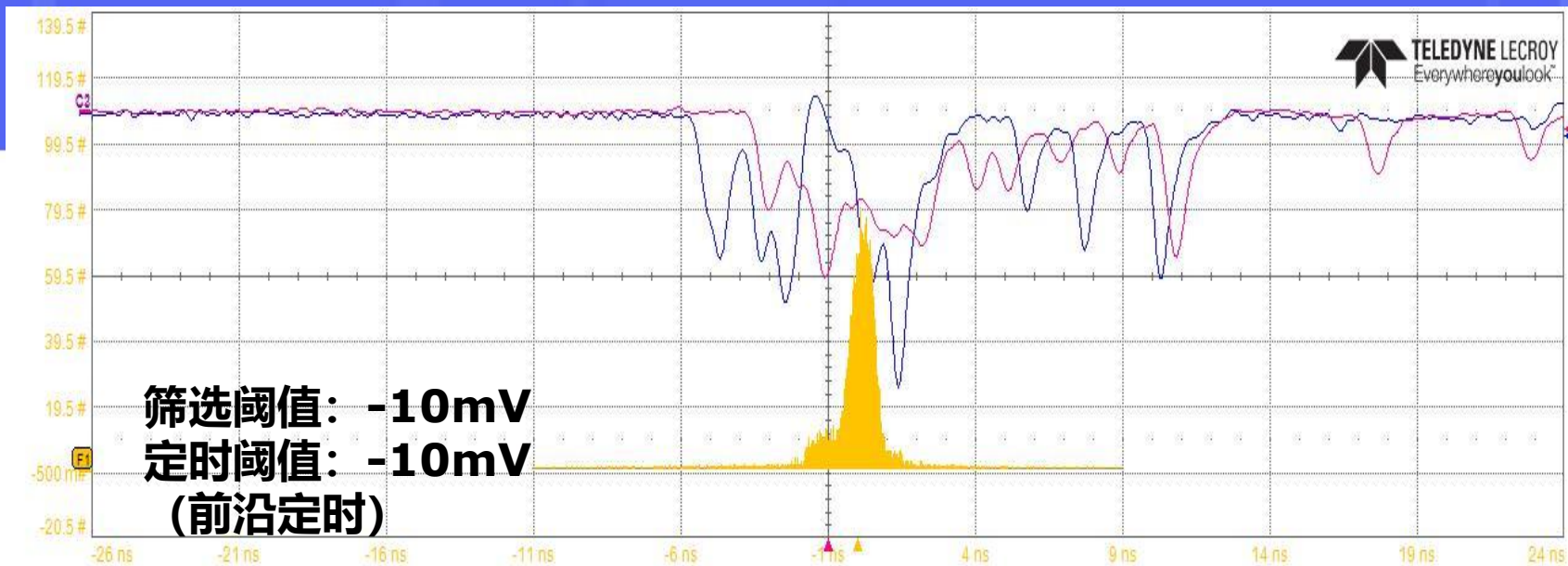
单阳极FPMT双端读出

耦合剂：硅油

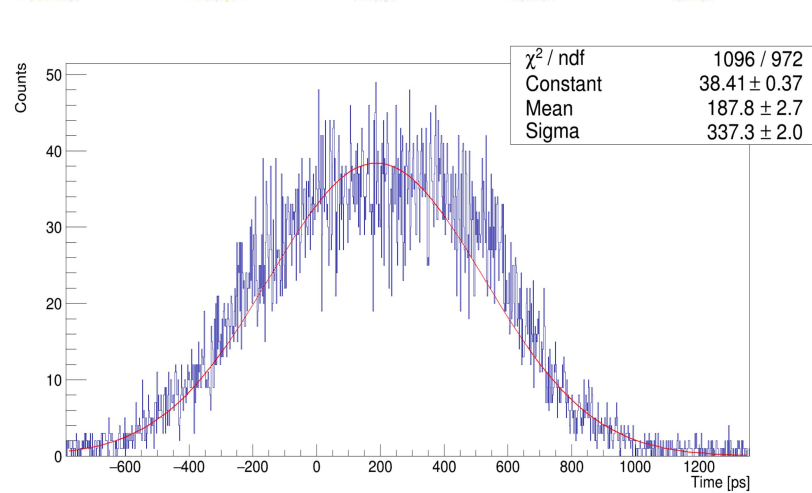
放射源： ^{90}Sr

DAQ：高采样示波器

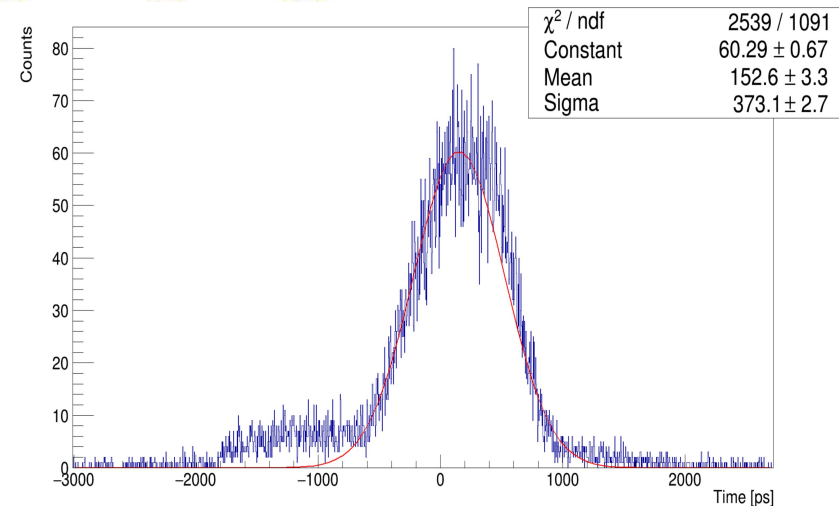
	HV/V	gain	P/V	幅度(SPE)	RT	FT	Width	TTS @SPE	TTS @MPE
FPMT-1	-2750	2.8E6	6.3	44.2mV	175ps	629 ps	308.9ps	26.6ps	7.4ps
FPMT-2	-1900	1.75E6	4.83	-	-	-	-	27.6ps	-



测试点1
Sigma: 347.7 ps



测试点2
Sigma: 337.3 ps

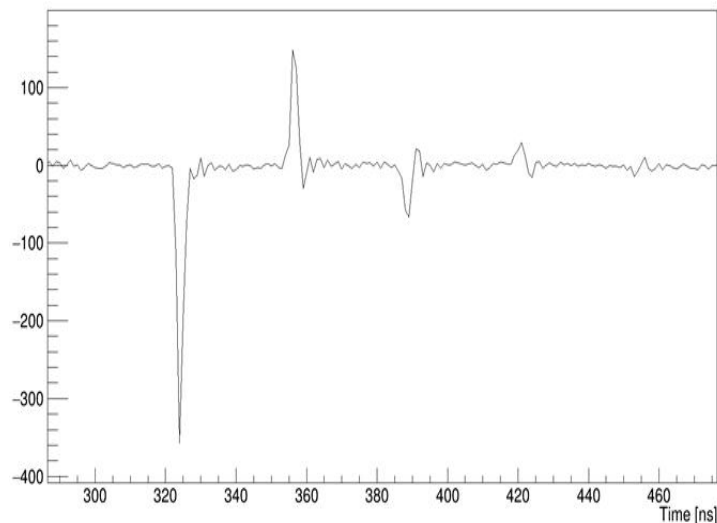


测试点3
Sigma: 373.1 ps

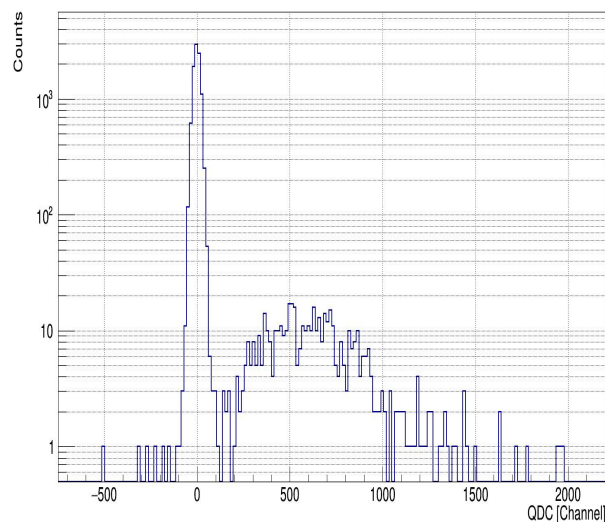
3.2 关键技术----- (3) FADC板

PS光源; FPMT+空base 使用 高采样示波器/波形采样板 对比数据

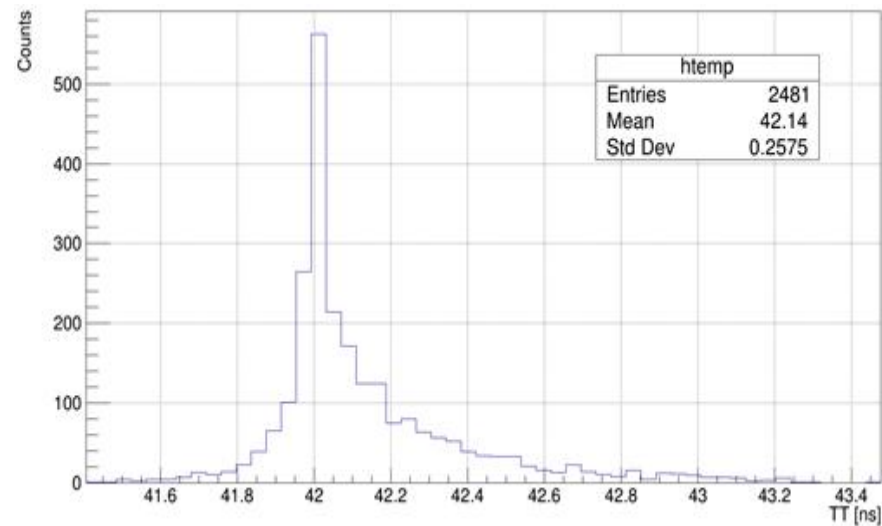
典型波形



SPE谱



50%恒比定时

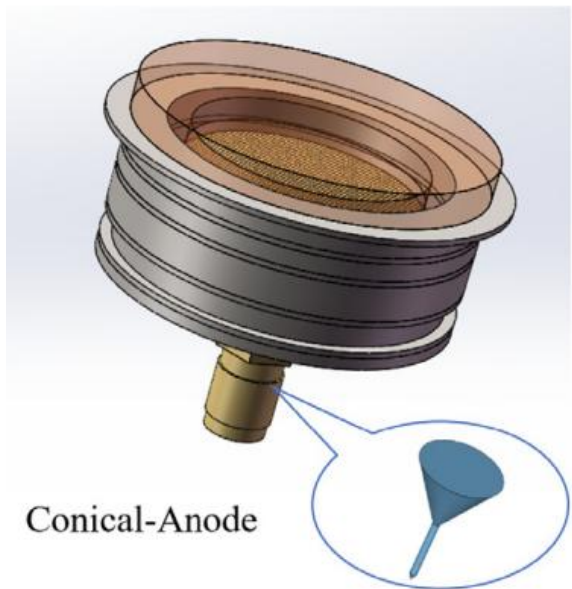


	HV/V	gain	P/V	幅度(SPE)	RT	TTS@SPE[Sigma]	预估CTR[FWHM]
示波器结果	-1700	5.9E6	19	46 mV	441 ps	59 ps	196 ps
波形采样板结果	-1700	-	7	~7 mV	1.6 ns	258 ps	856 ps

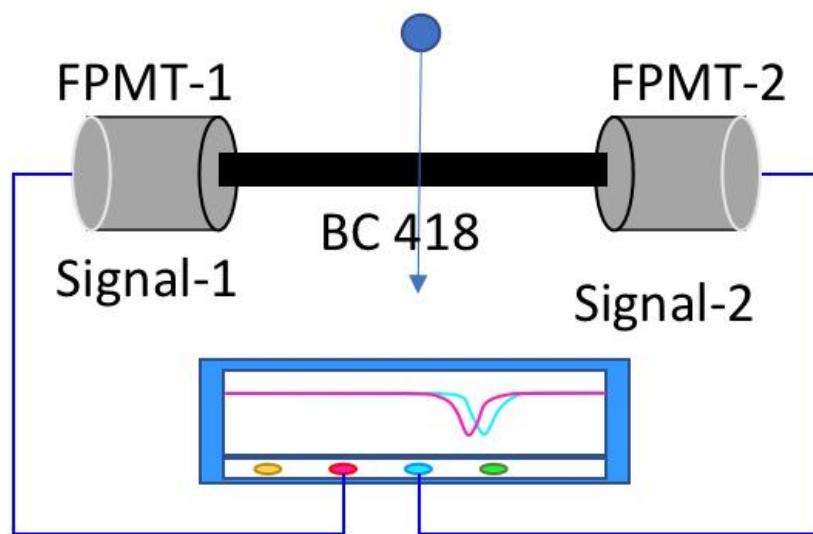
- 对于1.6ns上升时间的信号, 1G采样的波形采样板也可以实现**258 ps**的单光子TTS

3.3 原理验证-----束流实验

FPMT



人员: 马丽双, 吴琪

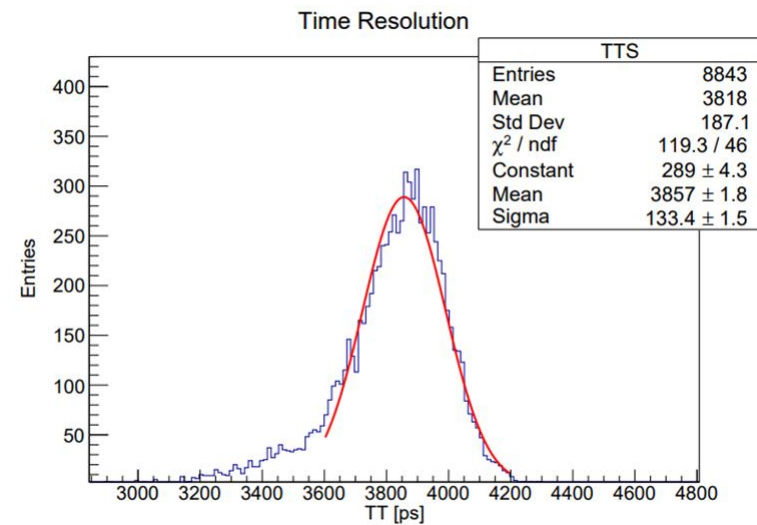
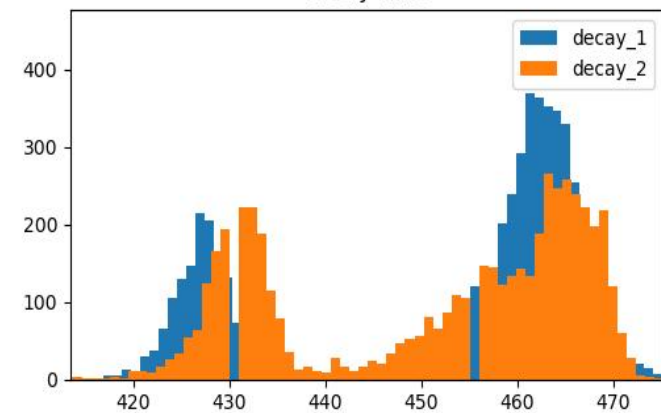
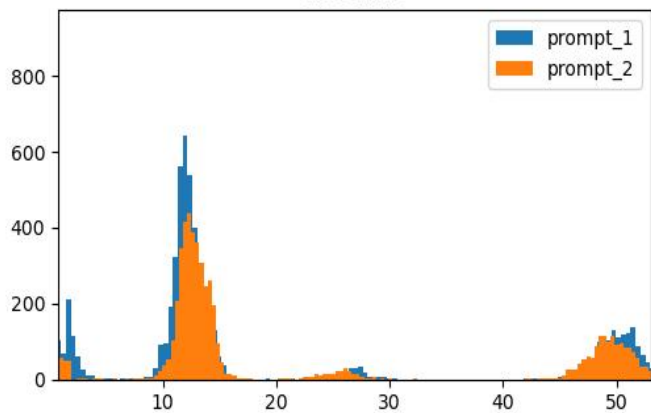
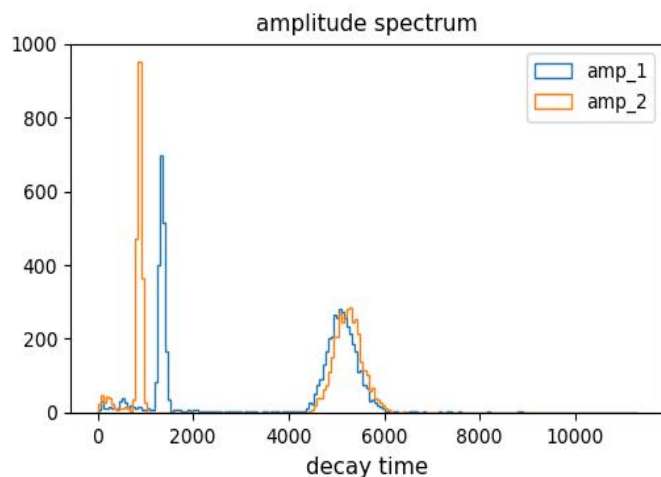
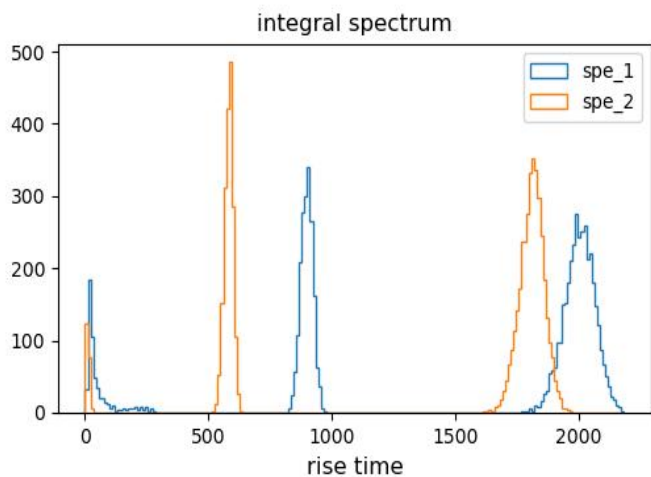


人员: 华哲浩

1GHz 高速采样板



人员: 胡俊, 宋瑞强



----事例筛选, 保留10ns上升沿的数据:

Coincidence time jitter ~ 133 ps

Single tube Time jitter ~ 93 ps

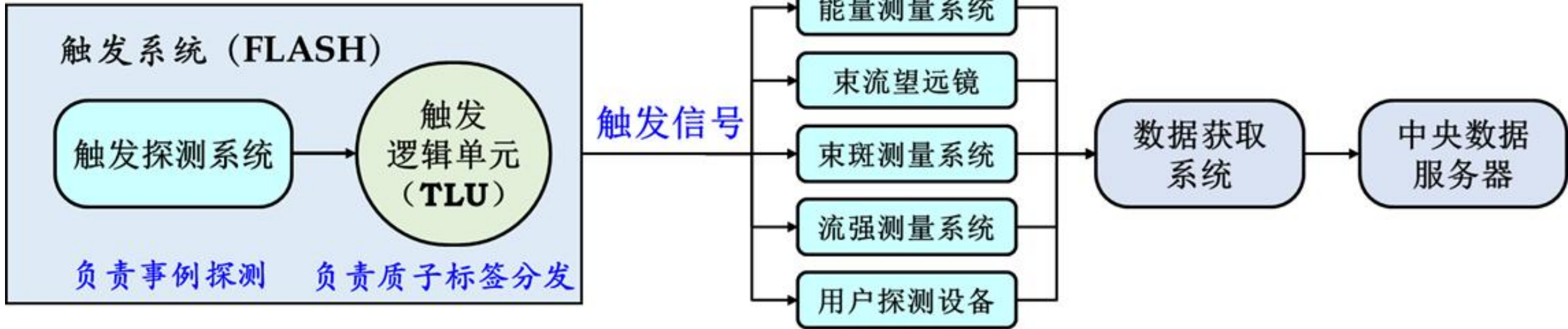
阈值过低会出现能谱上多光子谱, 总体波形上升时间在存在两个分布10ns和50ns, 衰减时间存在430ns和470ns;

	HV/V	gain	RT	FT	Width	TTS @SPE
5011	-3176	1.75E6	161ps	369ps	381.5ps	30.3ps
5003	-3400	1.25E6	172.6ps	432ps	385ps	26.5ps

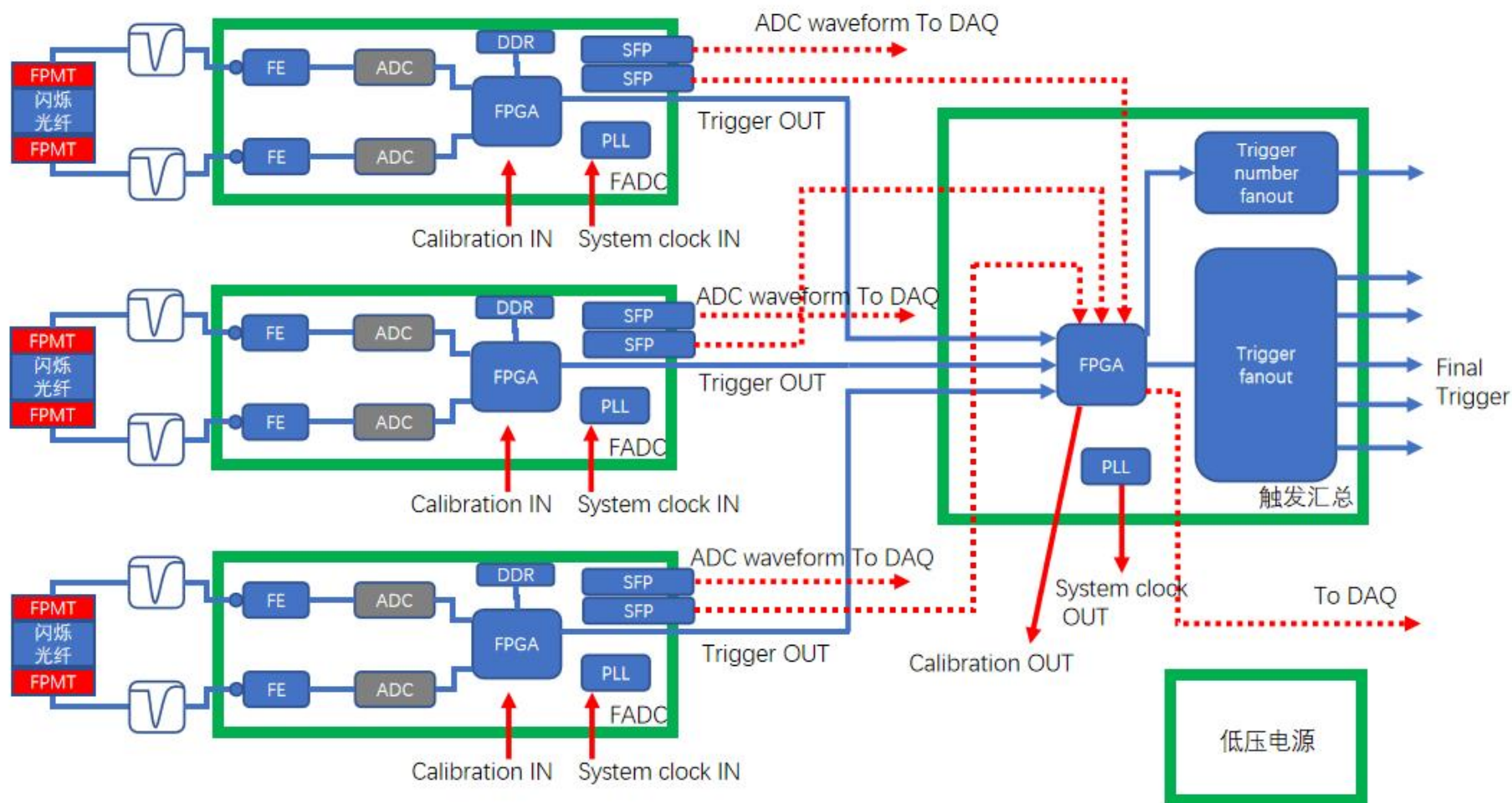
4.0 电子学方案设计----触发逻辑结构

触发系统通过触发号为每个质子编号
并分发给各探测系统

- 将触发号与数据打包
- 在线下通过触发号对齐事例

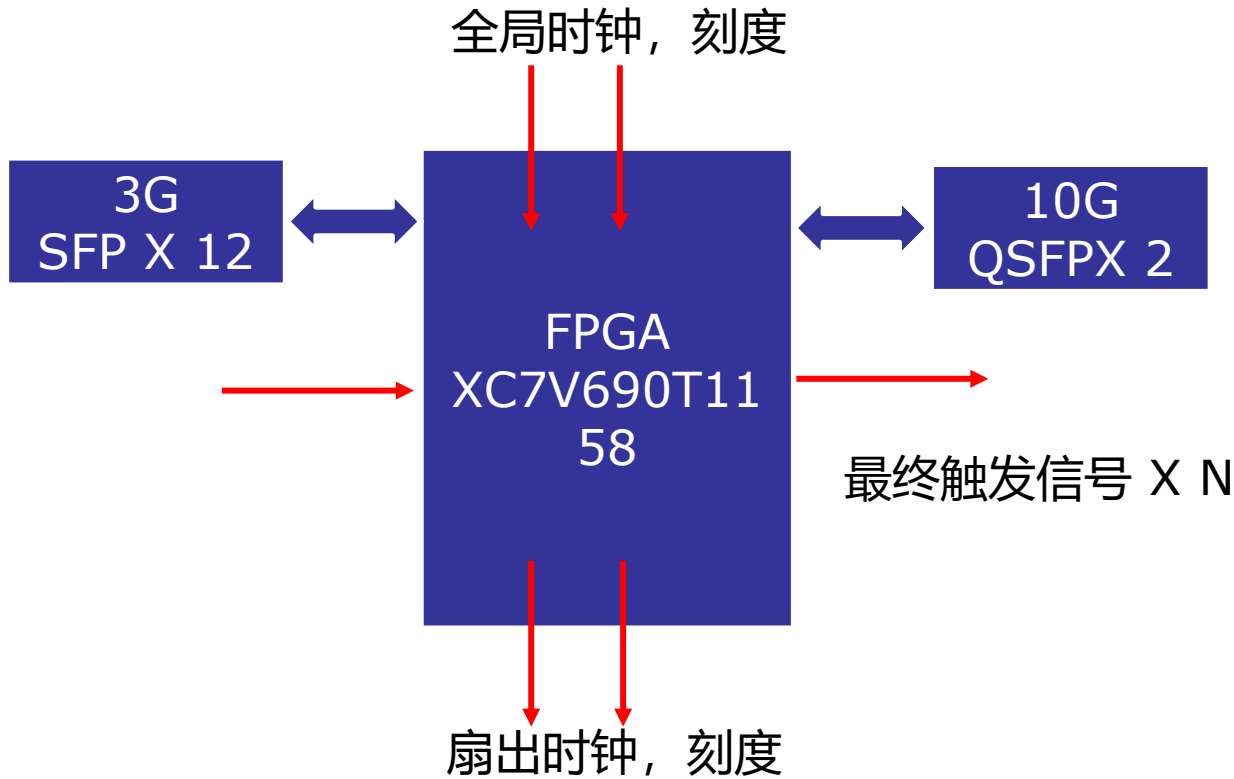


4.1 基于单路FPMT信号触发板



- 基于自研FADC
- (14bit @ 1Gsps)
- 全波形采样技术
- 灵活配置触发产生方式
- 数字过阈后汇总到出发汇总板完成逻辑或/与
- 触发汇总板直接汇总原始波形数据, 研究更多的FPGA实时触发算法
- DAQ获取原始波形数据完成离线触发判选分析

4.2 触发汇总板



最终的触发输出可以采用多种电平标准及自定义协议:

NIM、TTL、CMOS、LVDS、HDMI ...

■ 主要功能

- 接收6个通道传输来的过阈信息
- 实现在线触发算法
- 输出最终触发电平信号
- 扇出同步时钟信号
- 扇出刻度/同步信号

■ 设计参数

- 单通道传输数据率 > 6.6Gbps
- 板载内存4GByte
- 板载高精度温补晶振, 稳定性 $\pm 0.3\text{ppm}$, 老化率 $\pm 1\text{ppm}$
- 同步精度 < 100ps
- 触发延迟 < 2us

4.3 DAQ interface

- 数据传输采用直接网络传输方式
 - 最终与DAQ的连接采用TCP/IP方式（商业IP核）
 - 电子学内部插件之间数据传输采用Xilinx免费IP核完成
- 数据量的估计
 - 假定100K事例率下，触发窗500ns，无触发条件下单通道事例率16bit *
 $100K * 500 = 0.8Gbps$,
 - 单板接收2通道PMT信号，数据量1.6Gpbs
- 实时存储
 - 单板存储2GB，可以缓存10s

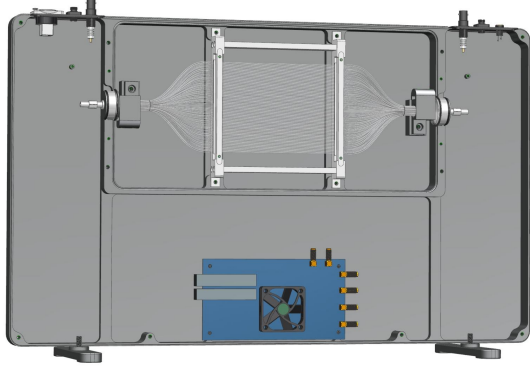


5.0 总结与计划

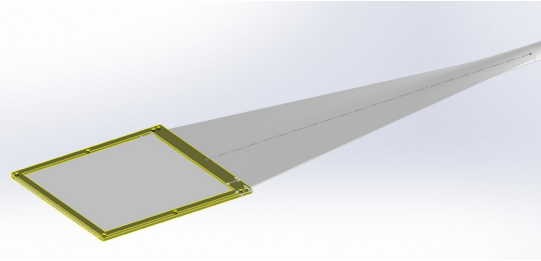
	项目进展	完成情况
方案设计	FPMT+闪烁光纤+FADC	已完成
关键器件选择	FPMT: NNVT	已完成
	BC420 闪烁光纤: 闪烁玻璃光纤	已完成
方案预研	FPMT+闪烁光纤 < 400 ps	已完成
	FADC < 300 ps	已完成
	触发板	进行中
样机研制	光纤阵列定制中、机械结构加工进行中	进行中
	闪烁光纤采购中、相关电子学研制中	进行中
样机测试	方案一: 实验室测试	待进行
	方案二: 束流测试	待进行



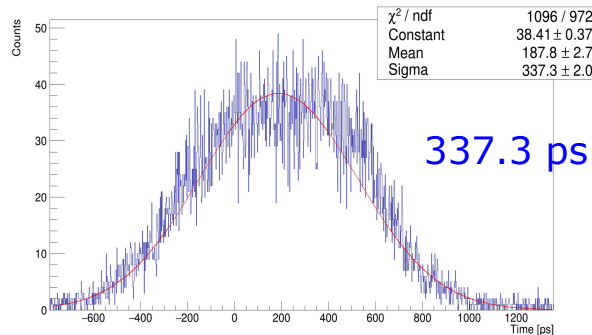
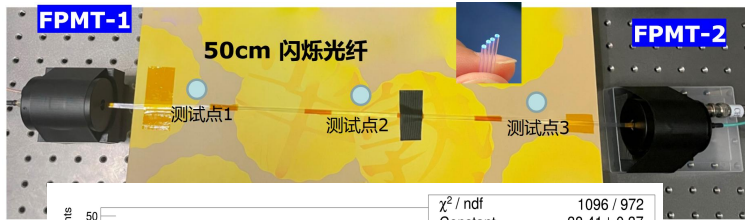
5.1 进展总结



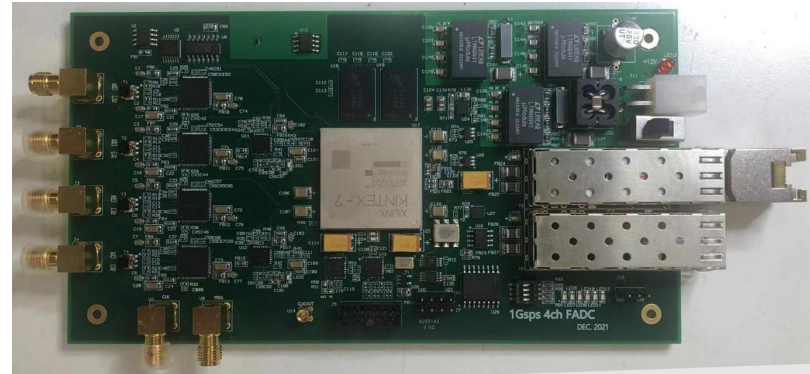
方案设计 ✓



关键器件选择
FPMT+闪烁玻璃光纤+FADC ✓



方案预研 ✓



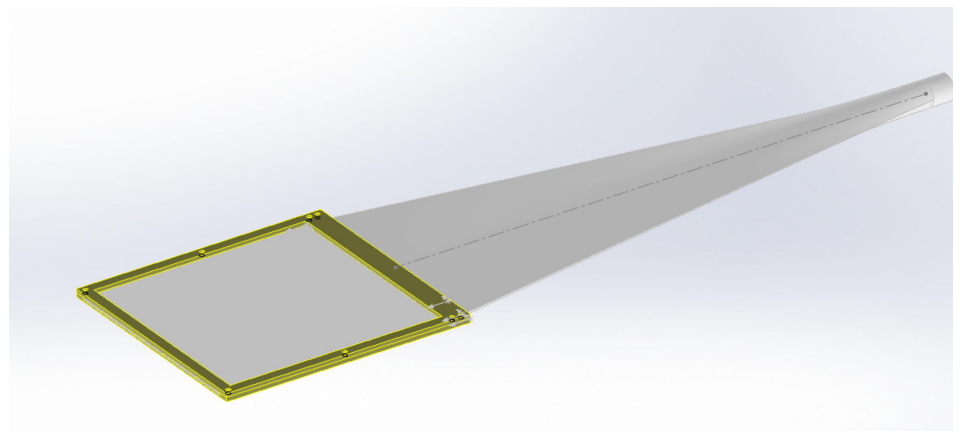
FADC 测试FPMT的单光子时间分辨~258 ps
符合要求 ✓

方案进展	完成情况
方案设计	已完成
关键器件选择	已完成
方案预研	已完成
样机研制	进行中
样机测试	待进行



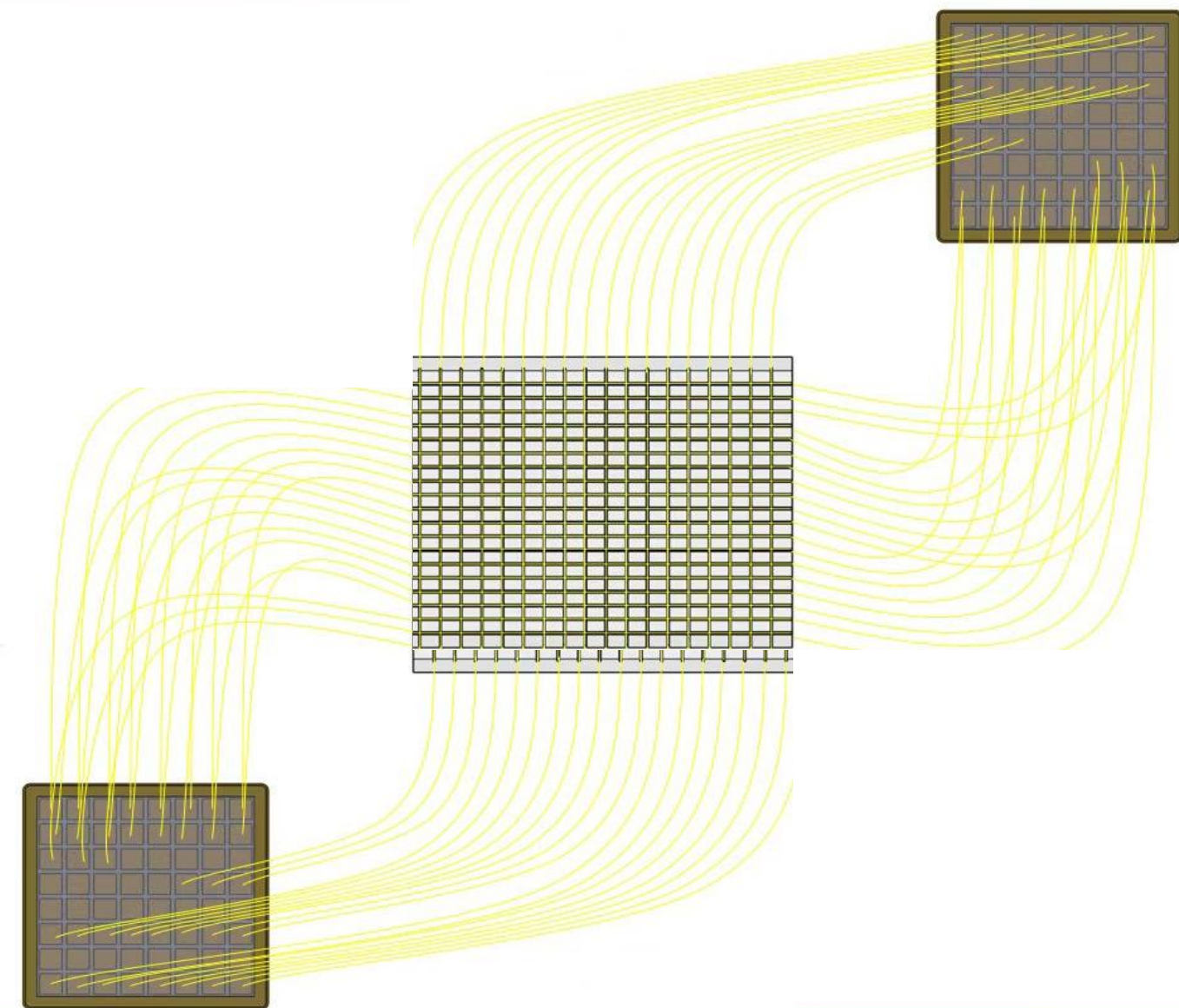
5.2 下一步计划

- 目前已完成探测器设计与方案验证
- 定制机械结构、相关材料与器件，进行探测器搭建
- 进行实验室测试验证
- 进行束流实验验证
- 配合其他探测器进行测试验证

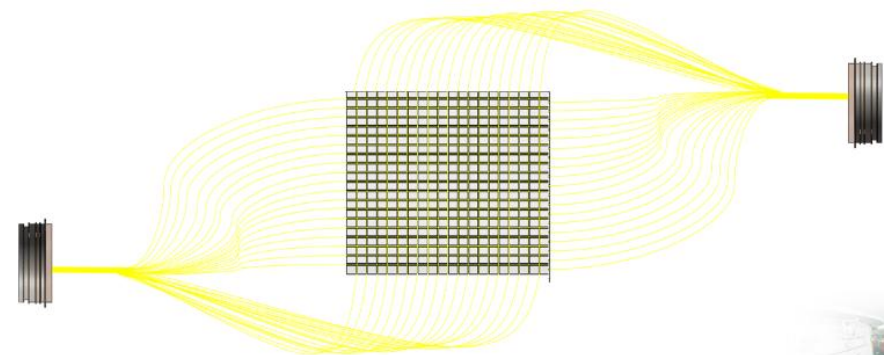


闪烁光纤排布设计已完成，近期将拿到光纤阵列成品。

5.3 升级计划 (1) --探测器

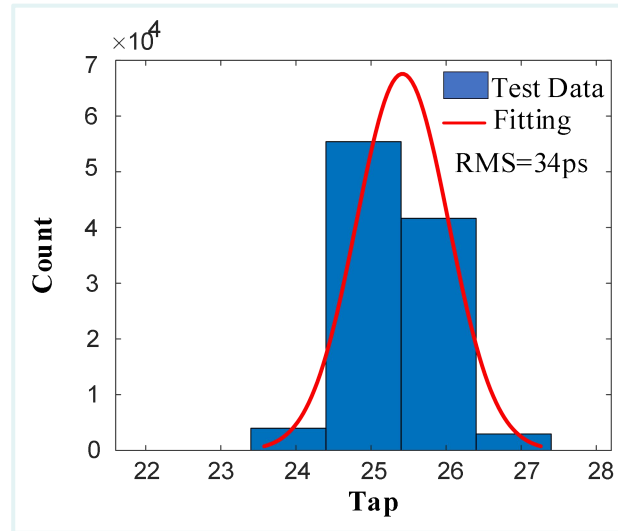
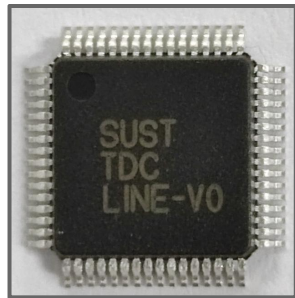


- 多阳极M-FPMT 替换 单阳极FPMT:
- 在保持时间分辨不变的前提下, X-Y两维光纤分别独立读出, 提供1mm的位置分辨;
- 波形采样, 获取电荷得到能量沉积信息; 获取时间分辨, 给出触发信息;
- **具有时间分辨的阵列BPM;**



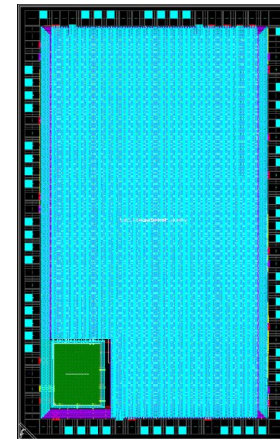
5.3 升级计划 (1) --电子学

ASIC TDC V1



- ASIC TDC的时间分辨率为**56ps**
- 测试精度为**34ps**,
- 微分非线性为[-0.02,0.02]LSB
- 积分非线性为[-0.015,0.02]LSB。

ASIC TDC V2



尺寸: 2.5mmX2.2mm

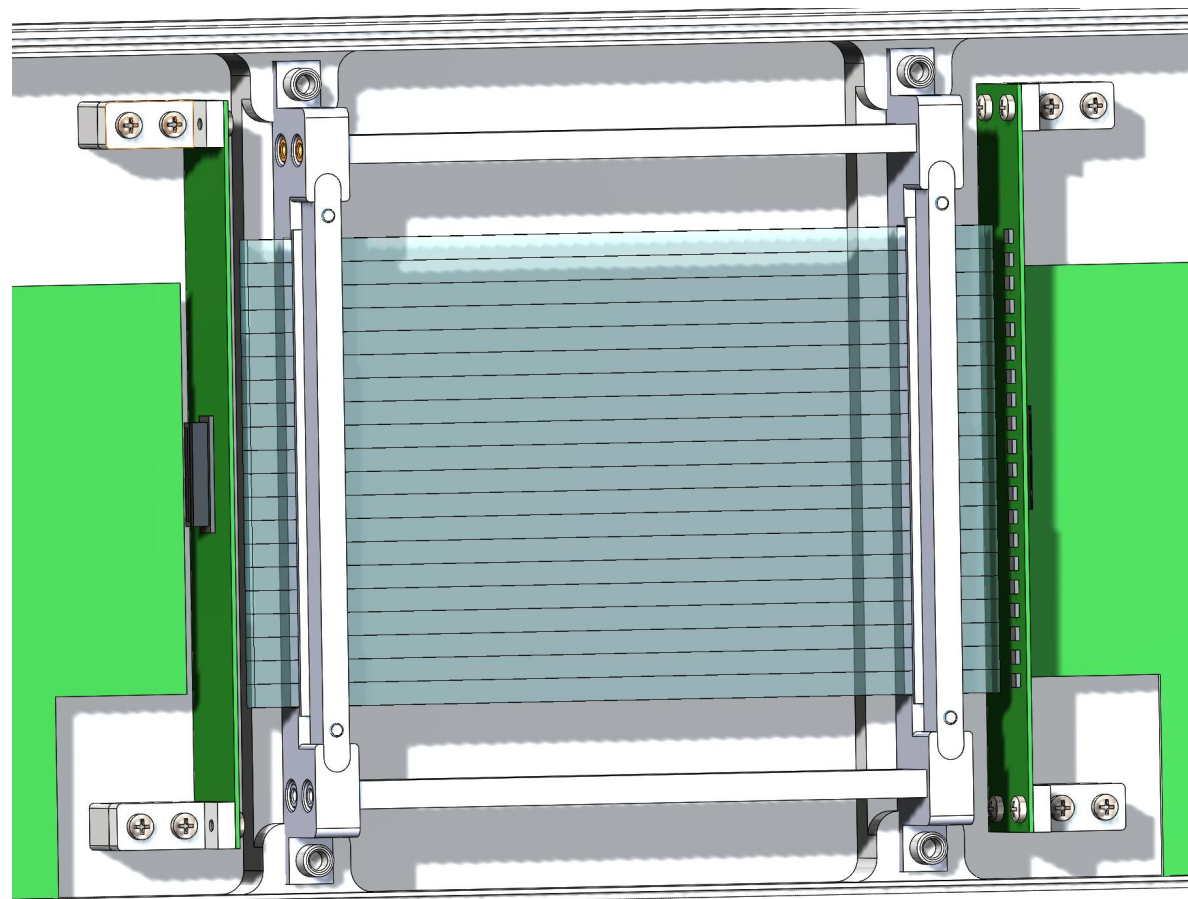
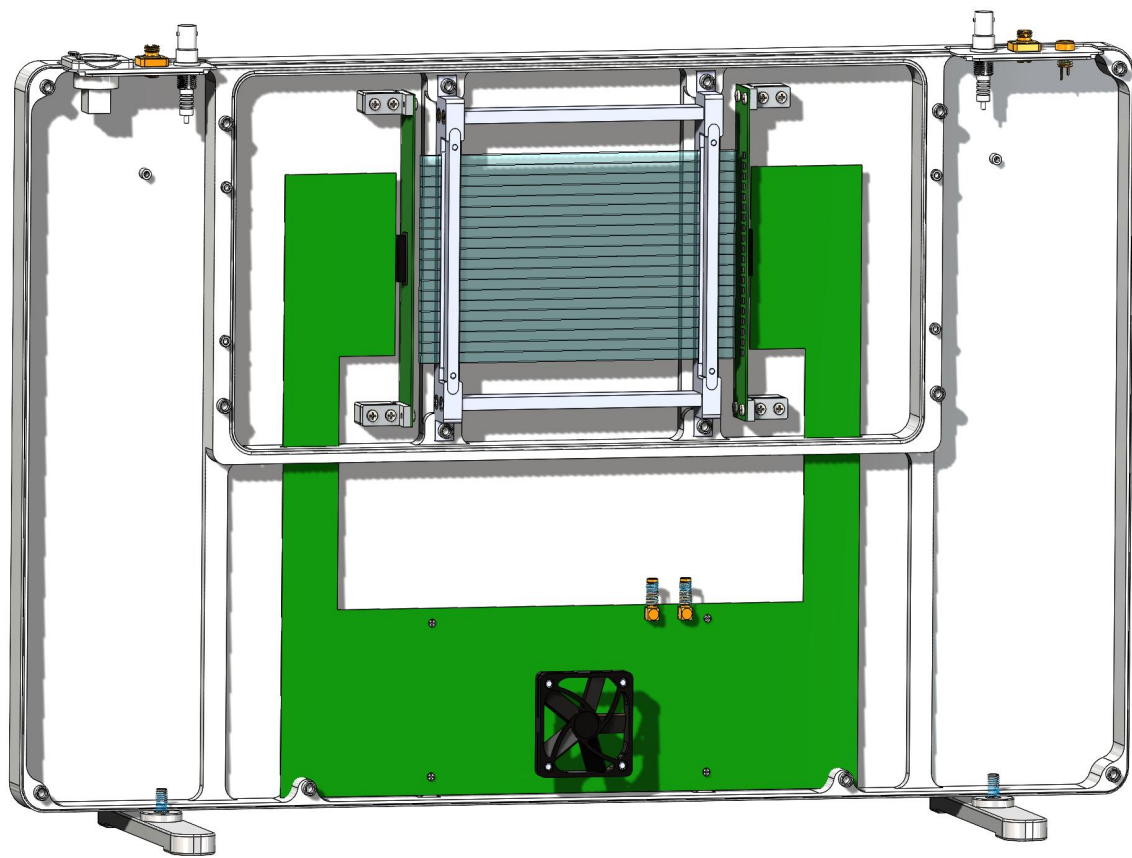
通道数: 5 (1个高精度通道)。

最小bin: **26ps**, 高精度模式下为**13ps**。

分辨: 预计可以达到**16ps**, 高精度模式下为**10ps**

5.3 升级计划 (2) --探测器

方案2: SiPM + 塑闪 + TDC



Backup

参数类型	参数名称	参数值
探测器 设计 参数	计数率上限	10kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	探测器数量	3组
	电子学通道	2CH X 3组
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	触发系统符合时间分辨	<1ns
	PMT单光子时间分辨	< 100ps
模块 高压 电源	电压范围	-3KV
	纹波	$\leq 100\text{mV}$, V_{pp}
	调节	可编程
	输出稳定度	<0.05%
	时漂/小时	<0.05%
	通道	$\geq 2\text{CH}/1\text{台}$

参数类型	参数名称	参数值
FADC 波形 采集卡 参数	FADC采样率	1Gsp/s
	采样窗宽度	可调整, 16-2048ns
	ADC位数	14bit
	死时间	<128ns
	动态范围	1.5V
	存储深度	>2GB
	通道数	$\geq 2\text{CH}/1\text{块}$
逻辑 符合 触发板	输入通道数	8ch
	输出通道数	8ch
	单通道传输数据率	>6.6Gbps
	同步精度	<100ps
	触发延迟	<2us
	板载内存	4GByte

Backup

部件	进口型号	进口价格	国产单位	具体负责人
超快光电倍增管	Photek 210	15万/只	北方夜视+高能所	马丽双
高压电源	CERN-DT	5万/台/4ch	天津森特尔LHAASO用外置高压电源; 四川大学核所低压-高压模块电源	韩纪锋
耐辐照光纤	?		哈尔滨工程大学	朱瑶
快速塑闪	圣戈班 BC418/422	5000/片	261, 高能科迪	华哲浩
信号符合系统	AIDA-2020	4万/台	高能所	胡俊
波形采样电子学	CAEN=DT5742	6万/8ch	高能所	胡俊
数据获取软件 控制软件集成			高能所	张银鸿



THANKS

