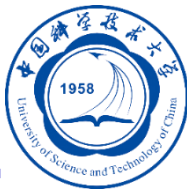


LHAASO大尺寸光电倍增管测试系统

江琨，唐泽波，李澄

中国科学技术大学近代物理系
核探测与核电子学国家重点实验室





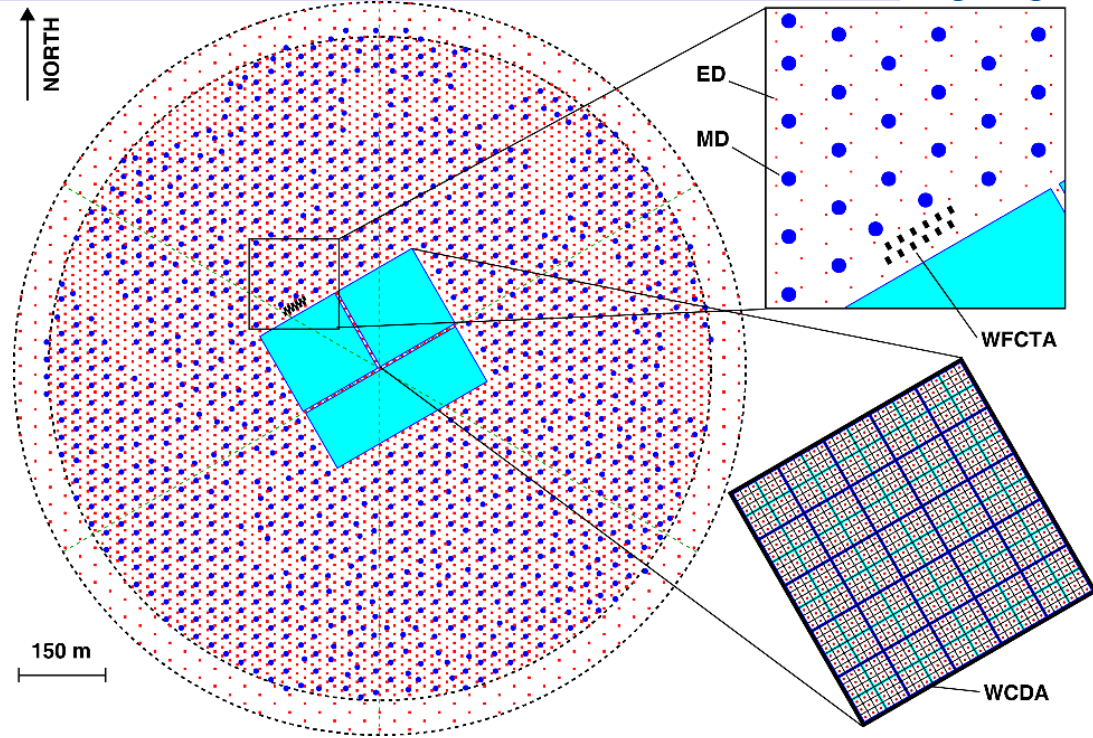
内容

- 背景
- PMT大动态读出电路设计
- 批量测试系统
- 总结

LHAASO大尺寸PMT：研制任务

主要科学目标：

- 高能宇宙线起源
- 伽玛巡天
- 暗物质、量子引力、洛伦兹不变性破坏等



主要研制任务：

- **水切伦科夫探测器阵列 (3000)**
- 平方公里探测器阵列
 - 电磁粒子探测器 (4901)
 - **缪子探测器 (1171)**
- 广角切伦科夫望远镜 (12)

大尺寸光电倍增管

小尺寸光电倍增管

硅光电倍增器



WCDA/MD: PMT主要测试参数比较

性能参数	WCDA	MD
高压响应曲线	✓	✓
确定工作高压	3×10^6	2×10^6
单光电子电荷谱	增益, 峰谷比, 相对量子效率	增益, 峰谷比, 相对量子效率
渡越时间分散 (TTS)	$< 4\text{ns}$	×
暗噪声计数率	$V_{\text{th}} = 1/3 \text{ PE}$	$V_{\text{th}} = 3 \text{ mV}$
后脉冲比例 (0.1 – 16 μs)	✓	✓
阳极非线性	133 PE	25 mA
打拿极非线性	4000 PE	1.6 A
阳极打拿极增益比	35-40	< 160

- WCDA/MD PMT测试尽量采用相同的测试设备与方案

大尺寸PMT选型

候选光电倍增管:

- 日本滨松R5912
- 北京滨松CR365
- 海南展创XP1805

三者的时间性能、噪声水平以及动态范围均比较接近:

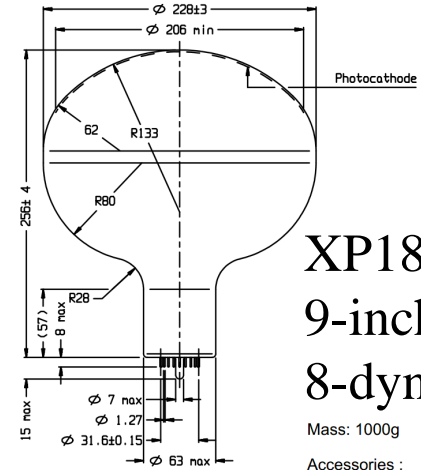
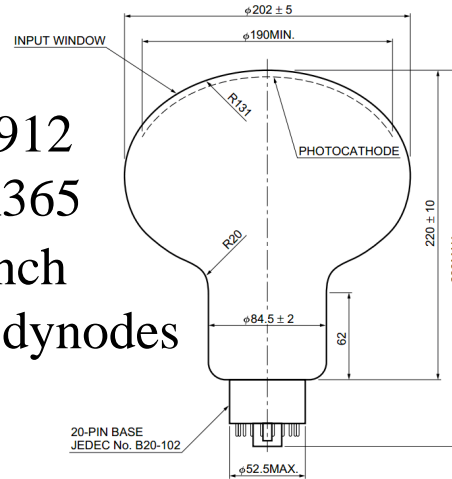
光阴极面积大
时间响应快
噪声水平低

R5912/CR365
单光电子分辨能力更好

R5912/CR365基本性能参数

Supply Voltage for Gain of 10 ⁷	—	1500	1800	V		
Anode Dark Current (after 30min. storage in darkness) ¹⁾	—	50	700	nA		
Dark Count (after dark condition for 15 hours) ¹⁾	—	4	8	kcps		
Time Response ¹⁾	Anode Pulse Rise Time	—	3.8	ns		
	Electron Transit Time	—	55	ns		
	Transit Time Spread (FWHM) ³⁾	—	2.4	ns		
Pre Pulse ⁴⁾	4ns to 20ns before Main pulse	—	0.5	2	%	
Late Pulse ³⁾	8ns to 60ns after Main pulse	—	1.5	3	%	
After Pulse ³⁾	100ns to 16μs after Main pulse	—	2	10	%	
Single Photoelectron	PHD (Peak to Valley Ratio)	—	2.5	—	—	
	Pulse Linearity ²⁾	at ±2% Deviation	—	60	—	mA
		at ±5% Deviation	—	80	—	mA
Magnetic characteristics (at 200mG/20mT)	Sensitivity Degradation	—	10	—	%	

R5912
CR365
8-inch
10-dynodes

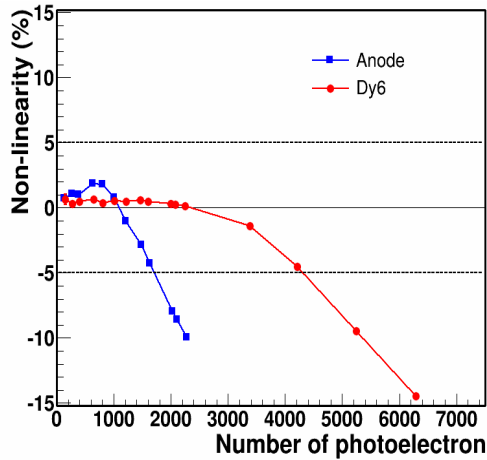
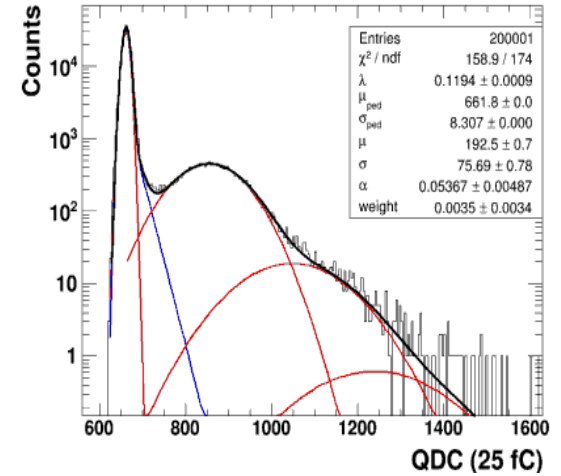
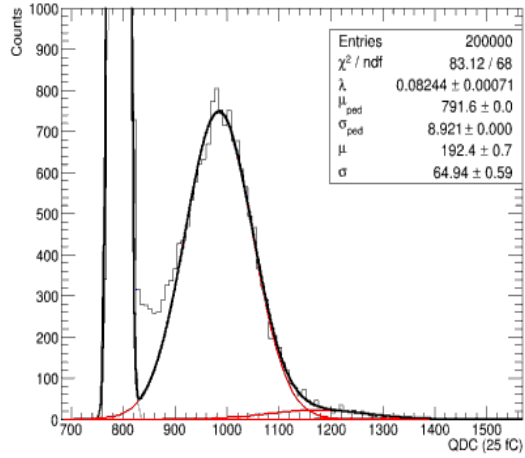
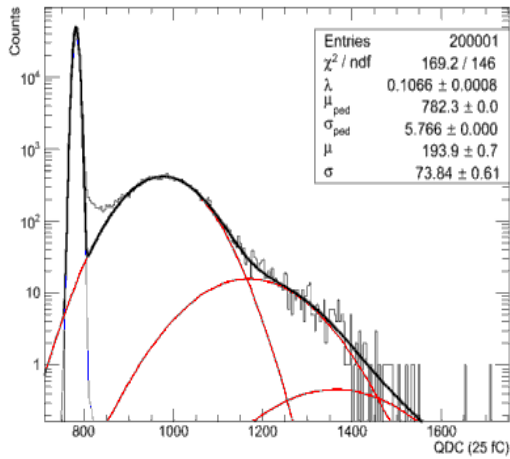


XP1805
9-inch
8-dynodes
Mass: 1000g
Accessories :
Socket : FE2019

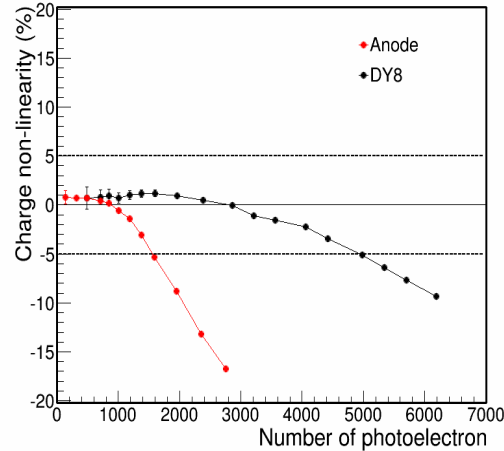
XP1805基本性能参数

Characteristics with voltage divider B	Min	Typ	Max	Unit
Gain slope (vs supp. Volt., log/log)		6		
For a gain of		10 ⁶		
Supply voltage *	1300	1700	1950	V
Anode dark current *		15	50	nA
Background noise *		5000	10000	c/s
Single electron spectrum peak to valley ratio*	1.2	1.4		
Mean anode sensitivity deviation :				
Long term (16h) :		1		%
After change of count rate :		4		%
Vs temperature between 0°C and +40°C at 400nm :		0.2		%/K
For a supply voltage of : 1700V	Min	Typ	Max	Unit
Gain		10 ⁶		
Linearity (2%) of anode current up to :		60		mA
Anode pulse :				
Rise time :		2.7		ns
Duration at half height :		6.5		ns
Transit Time spread (FWHM) :		2.4		ns
Transit time :		20		ns

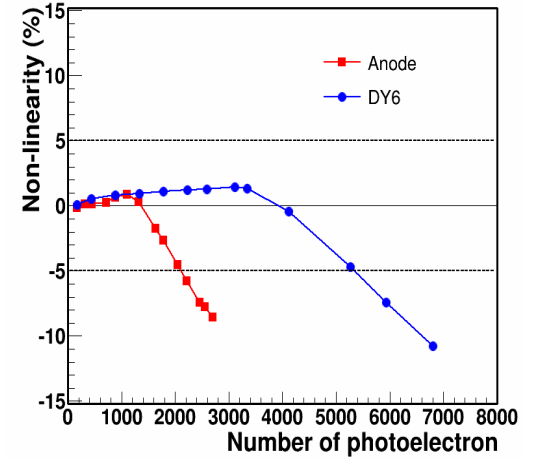
WCDA 分压电路设计



R5912



CR365



XP1805

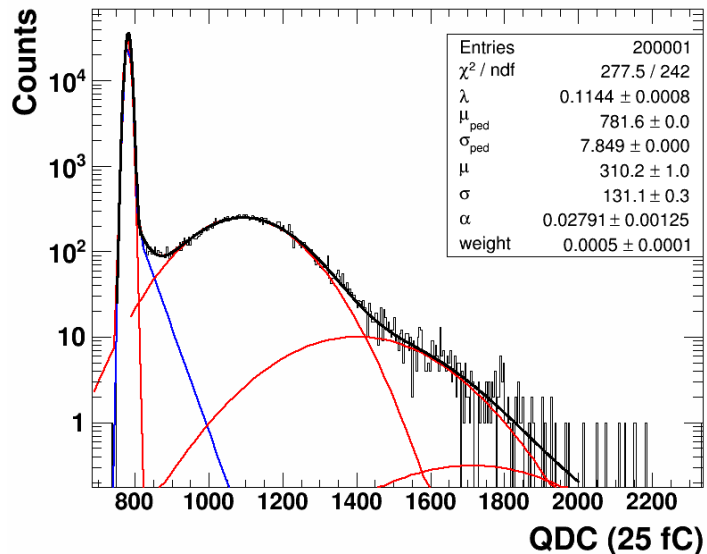


WCDA PMT性能对比

PMT型号	XP1805			CR365			R5912
管号	No.146	No.214	No.251	SA0042	SA0059	SA0063	SD2527
β	5.16	5.43	5.44	7.18	7.15	7.21	7.78
HV (V)	1647	1498	1450	1121	1191	1111	985
能量分辨率	45.4%	39.3%	40.6%	33.1%	37.8%	32.7%	38.6%
峰谷比	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7	3.1	2.6
幅度 (mV)	5.4	4.8	5.2	5.1	5.0	4.3	4.5
TTS (ns)	2.6	2.8	3.2	2.5	2.2	2.8	3.4
暗噪声 (Hz)	3700	2000	4000	1800	840	1400	592
后脉冲率	1.3%	0.7%	1.0%	2.5%	1.8%	0.8%	1.6%
阳极NL (PE)	1900	2100	1580	1500	1900	1750	1700
打拿级NL(PE)	6300	5340	6300	5000	6800	6600	4300
增益比	26.0	24.0	31.6	40.3	47.8	44.2	37.6

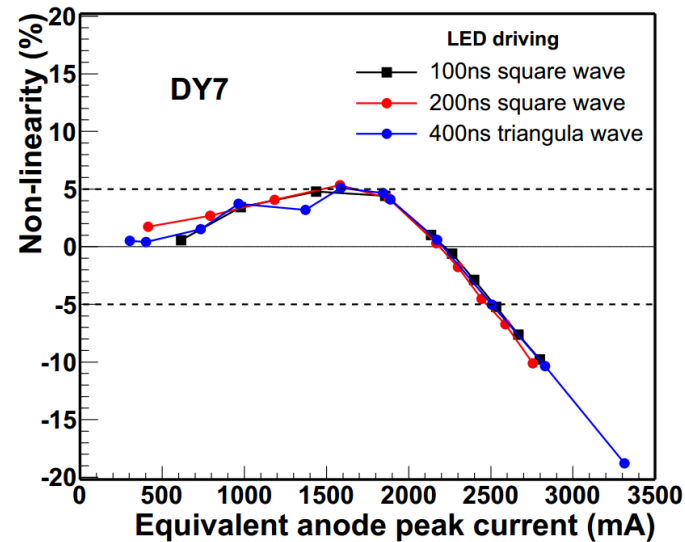
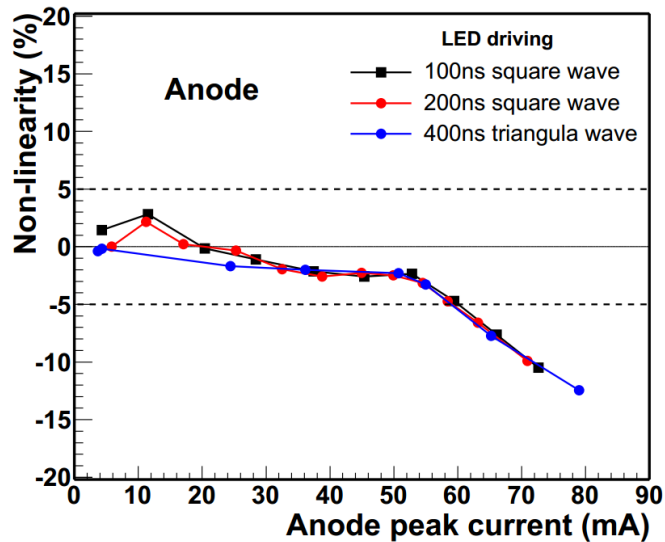
对每种管型均设计出符合要求的分压器

MD 分压器设计



R5912, CR365和XP1805均能满足非线性要求

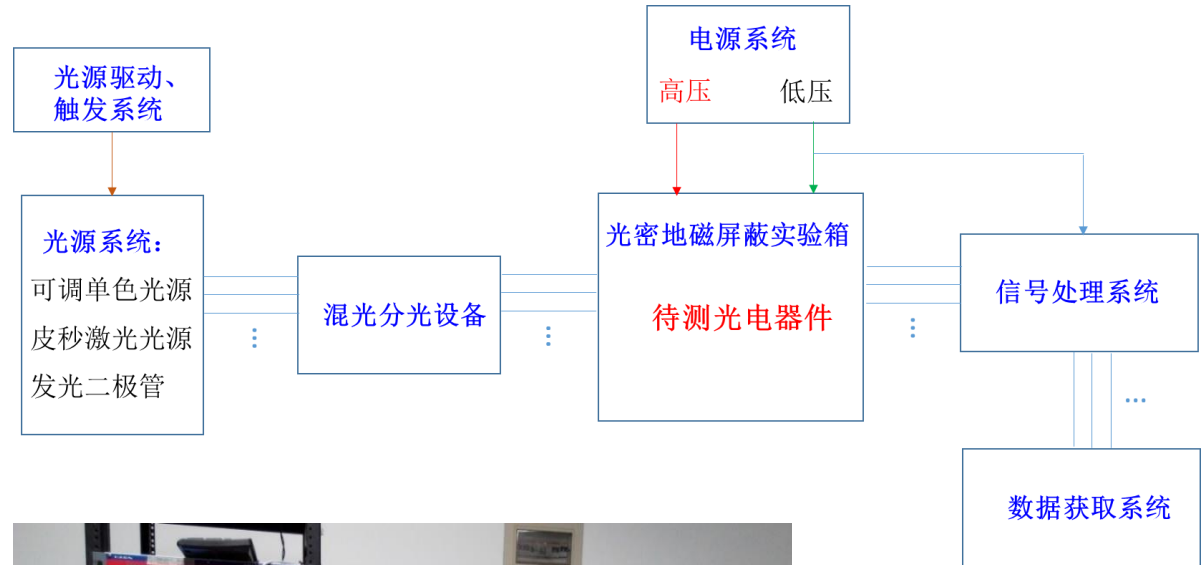
与XP1805相比, CR365一致性较好



PMT批量测试系统

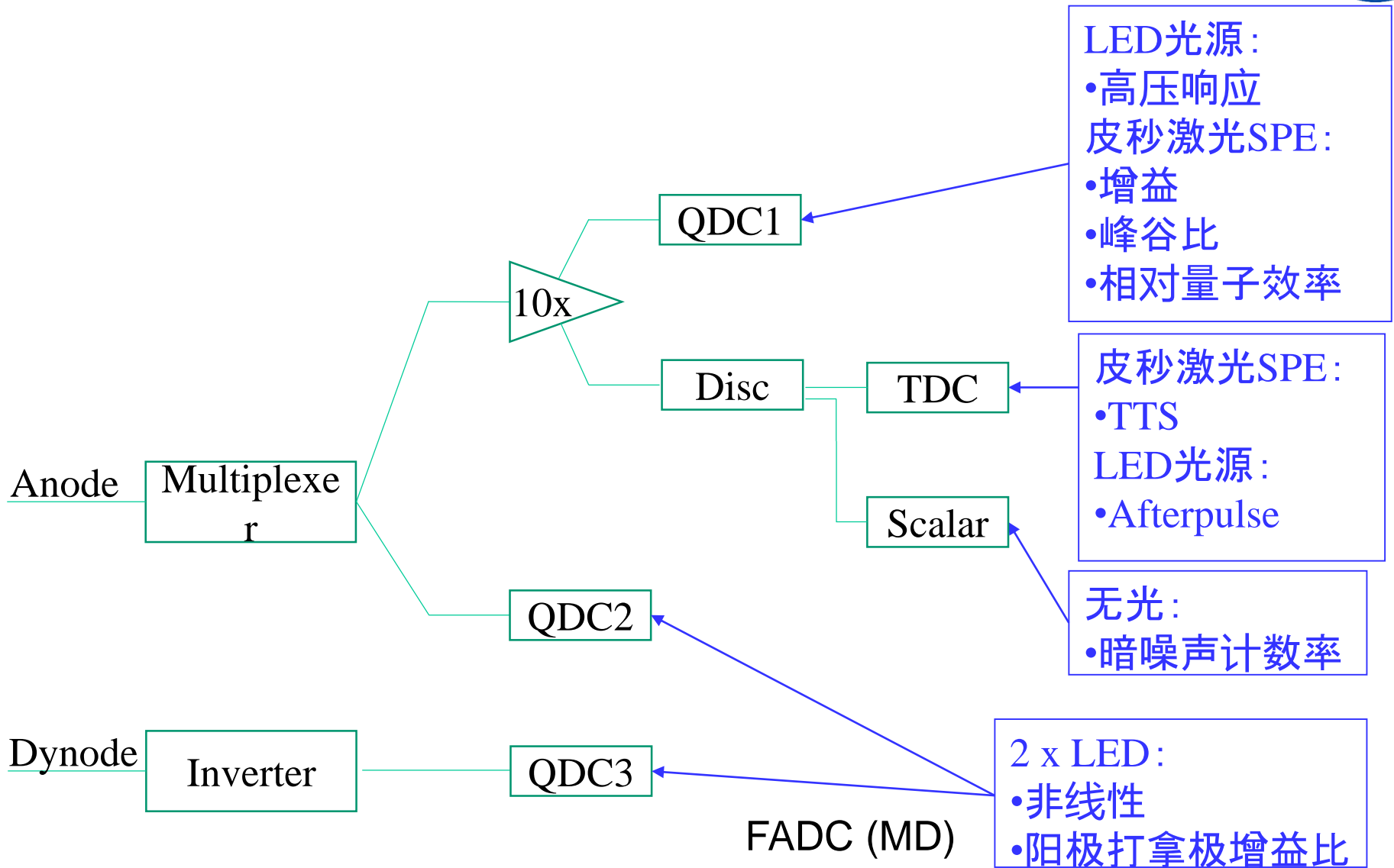
测试内容:

- 高压响应曲线及增益
- 单光电子测量
 - 峰谷比
 - 电荷分辨
 - 渡越时间分散
- 相对量子效率
- 暗噪声计数率
- 后脉冲比例
- 阳极打拿级增益比
- 非线性

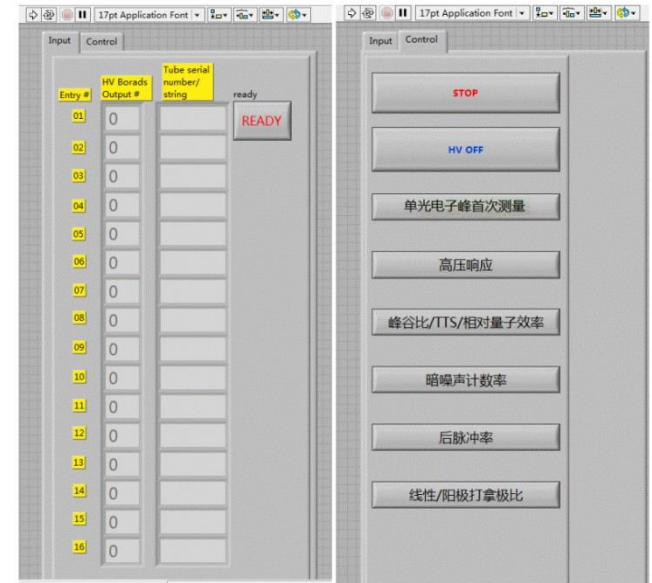
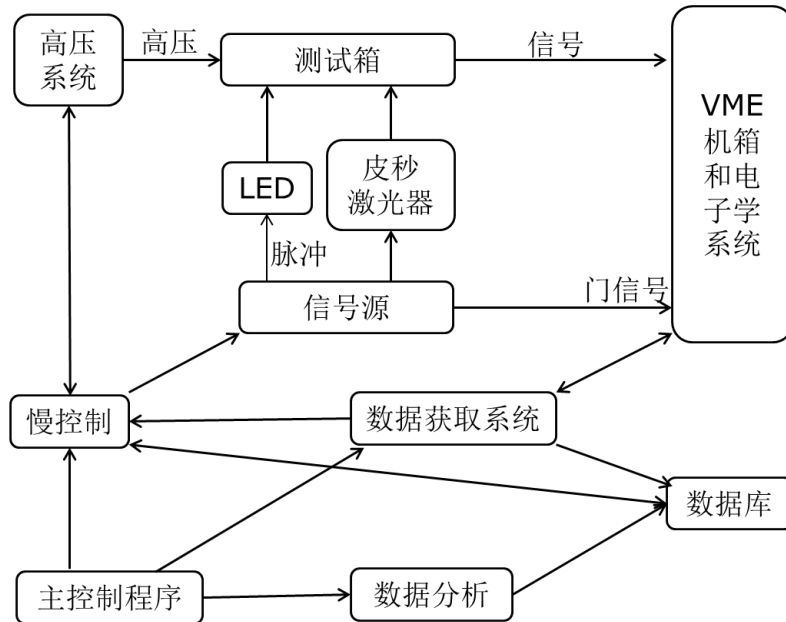


* 要求WCDA与MD尽量采用相同的测试设备与方案
* 自动化

信号处理系统



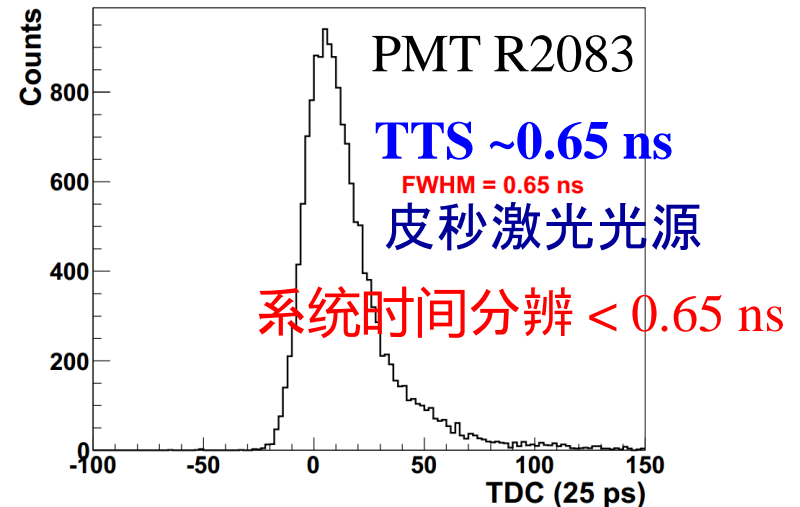
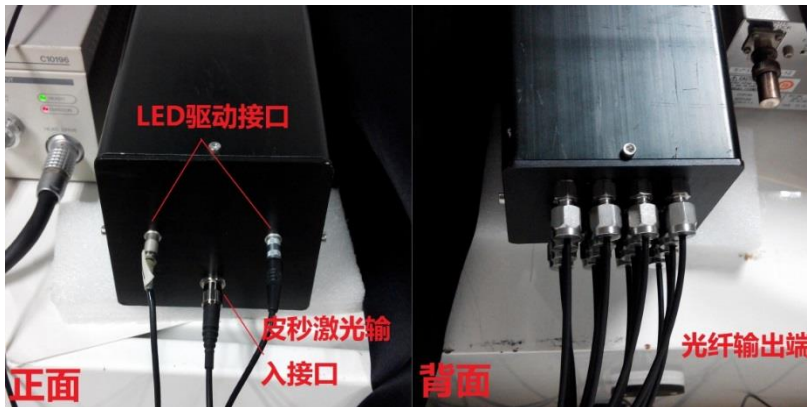
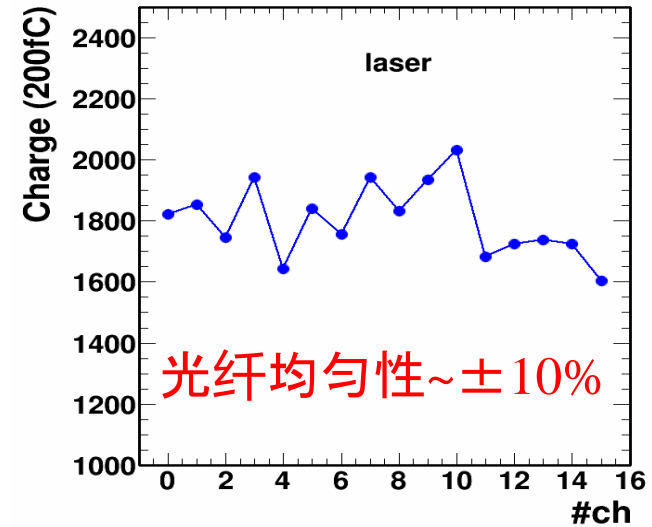
控制与数据获取系统



- 用LabVIEW实现慢控制和数据获取
- 基于ROOT的分析软件分析测试数据
- LabVIEW调用分析软件实现交互式测量-分析

光源系统

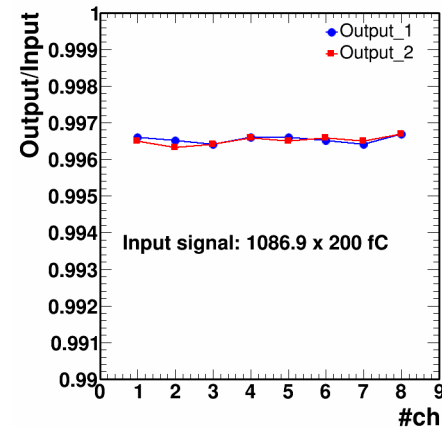
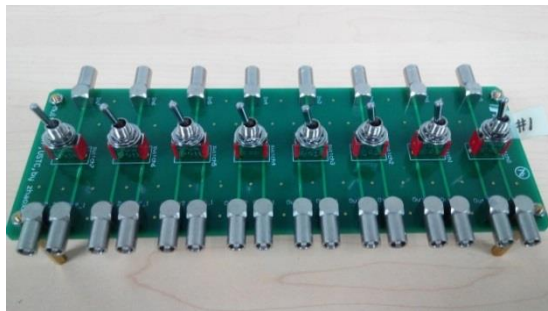
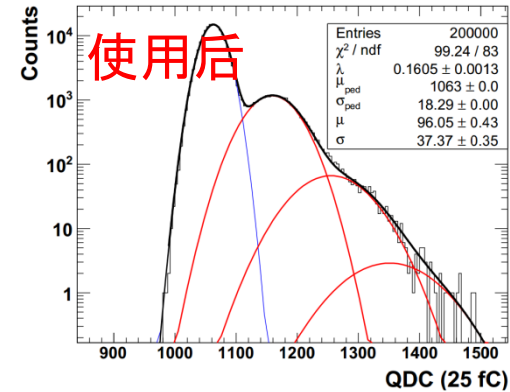
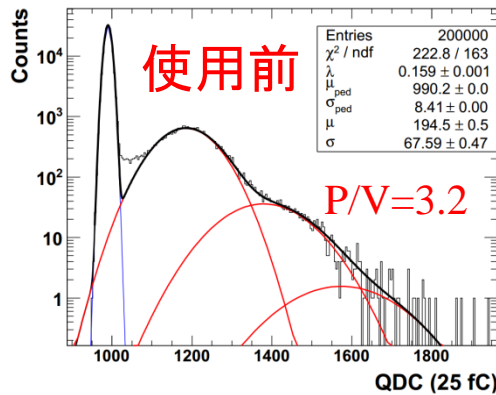
- 皮秒激光光源 + LED
 - 皮秒激光光源: 单光电子性能测试, 时间性能测量
 - LED: 非线性测试, 后脉冲比例测试
- 混光: 不同光源之间切换
- 分光: 多只PMT同时测试



多路选通器

- 单光子测量需要放大器，而放大器输入信号范围为200 mV
- 无法满足非线性测量，需要将信号分流
- 国际上其它实验均采用电阻分流
- 我们采用机械开关选通

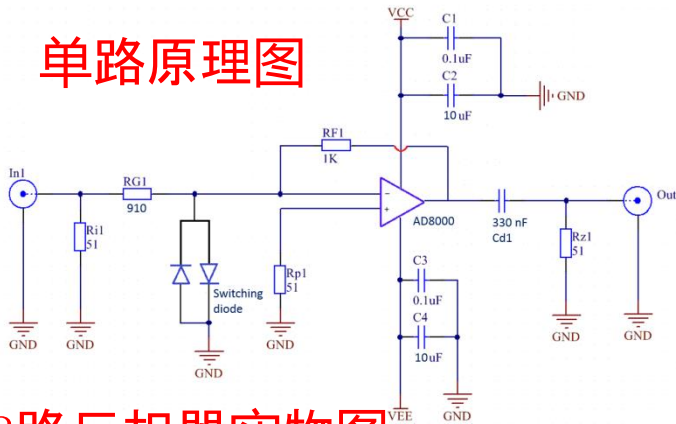
Spliter电阻分流测试结果



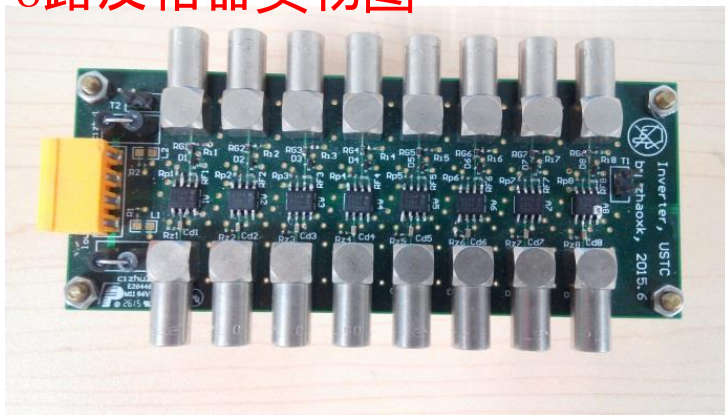
多路反相器

- WCDA和MD均采用阳极和打拿极读出，打拿极为正信号
- QDC只能处理负信号，打拿极信号需要反相
- 商用反相器一般单路，且为无源器件，有带宽和信号衰减的限制
- 利用高速AD放大芯片自制多路反相器 (-1x)

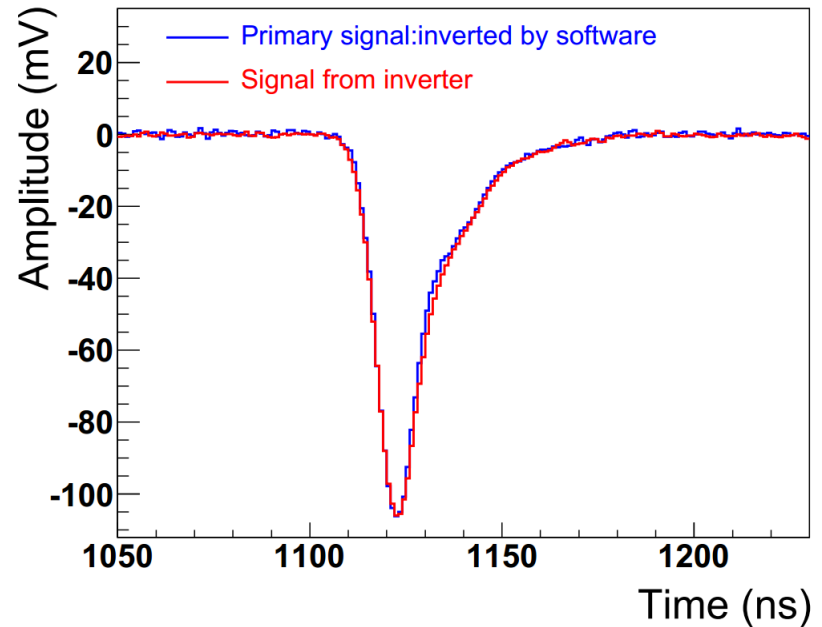
单路原理图



8路反相器实物图



反相效果



后脉冲测试

传统后脉冲测试方法：

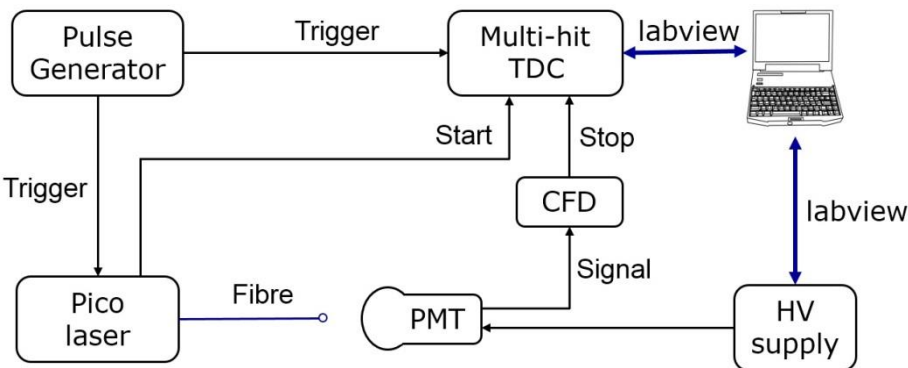
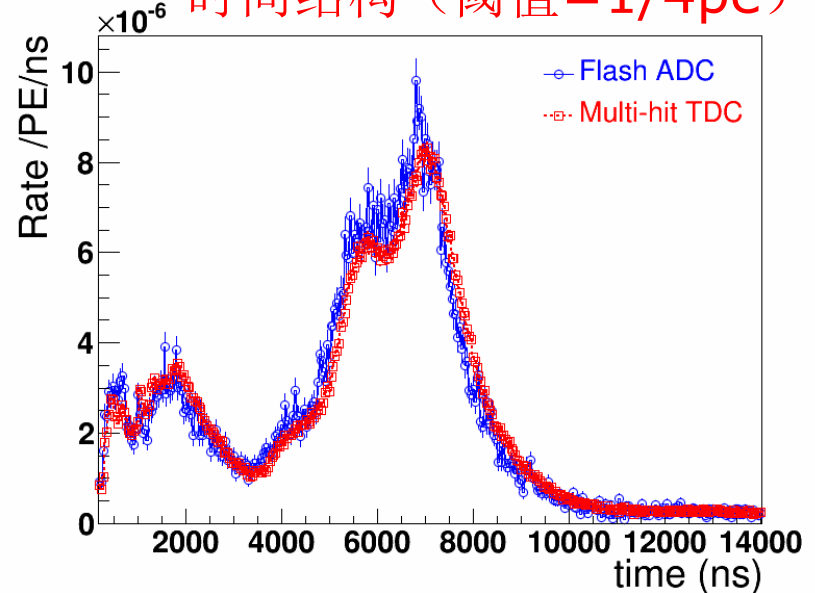
- 延迟门电荷积分
 - 数据采集快, 简单
 - 信息量少
 - 门宽范围有限
- 数字波形分析
 - 信息量多
 - 数据采集慢
 - 数据量大
 - 分析较复杂

我们采用基于多击中TDC的技术进行测试

- 结果与基于FADC的结果符合
- 优点是：数据采集快，数据量小，分析简单
- 适合批量测试、实时分析

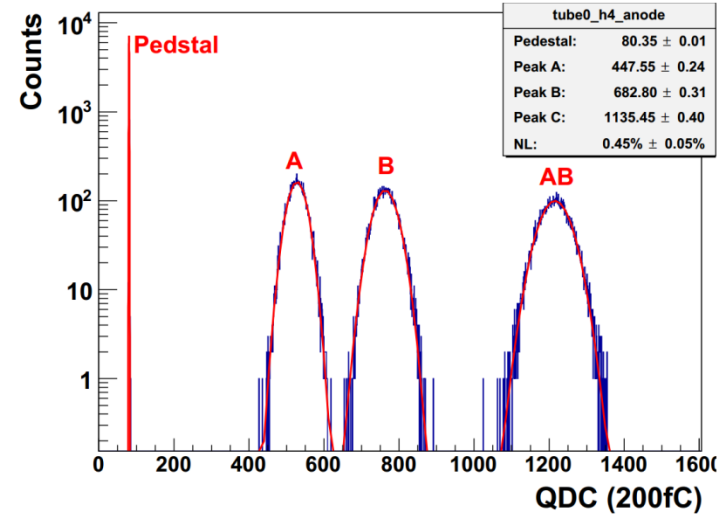
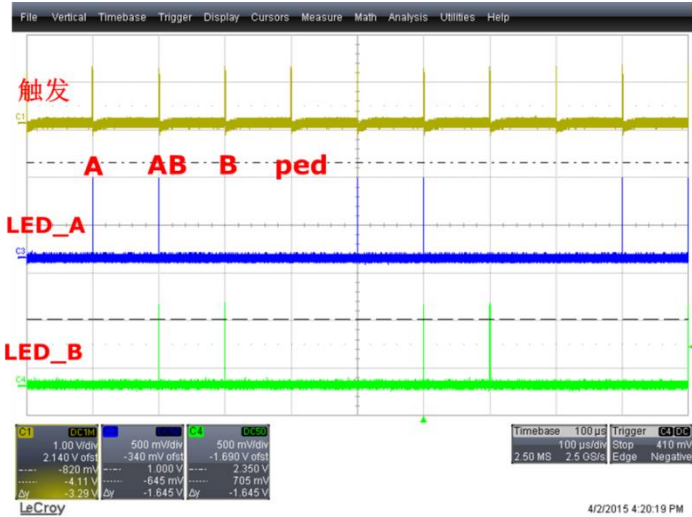
R5912结果

时间结构 (阈值=1/4pe)

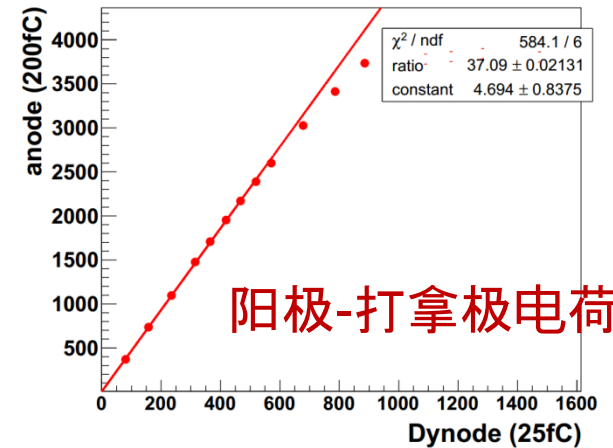
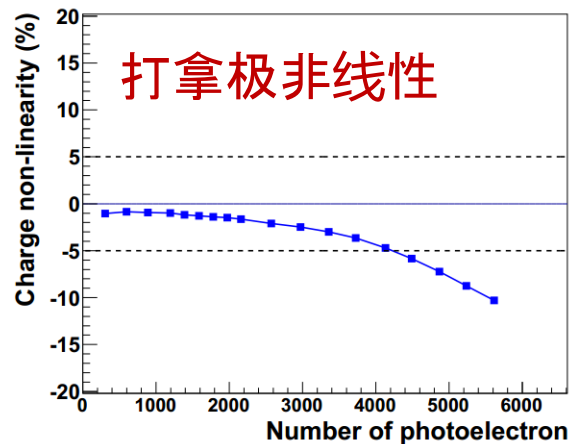
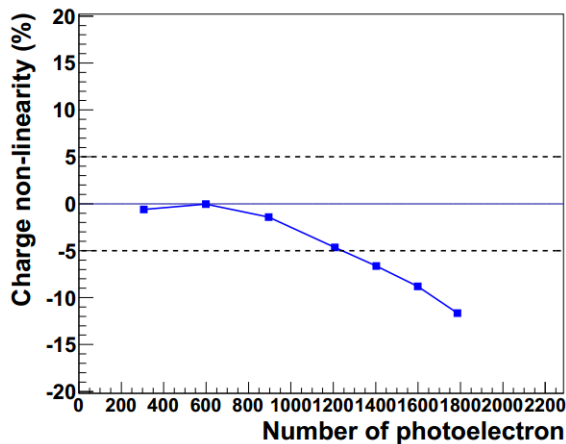


非线性测试

- A-B法, 降低对系统稳定性要求



交替测量A, B, A+B, Pedestal





系统测量精度:小批量测试验证

测试参数	WCDA-PMT测试精度要求	已实现的精度
确定工作高压	相对误差<0.5%	相对误差<0.5%
高压响应曲线	高压误差<0.5%	高压误差<0.5%
单光电子谱峰谷比	<0.2	<0.2
TTS	<0.1 ns	<0.1 ns
相对量子效率	10%	10%
暗噪声计数率	WCDA/MD :<0.5 kHz	<0.5 kHz
线性度	1.5%	1.5%
阳极打拿级增益比	<10%	<10%
后脉冲率	<2%	<2%
测试参数	MD-PMT测试精度要求	已实现的精度
单光电子增益 (1200V)	相对误差<1%	相对误差<1%
高压响应曲线	相对误差<0.7%	相对误差<0.7%
确定工作高压	相对误差<0.2%	相对误差<0.2%
单光电子峰谷比 (1200V)	相对误差<5%	相对误差<5%
暗噪声计数率 (3mV)	相对误差<5%	相对误差<5%
线性度	相对误差<10%	相对误差<10%
阳极打拿级电荷比	相对误差<10%	相对误差<10%
后脉冲率	误差<5%	误差<5%
单光电子分辨率	相对误差<10%	相对误差<10%



总结

- 针对LHAASO-WCDA和MD两个实验特点, 为候选PMT XP1805、CR365、R5912设计了大动态读出电路
- 研究优化了PMT性能测试方法, 解决了一系列关键技术问题
- 搭建批量测试装置, 提出了完整的批量测试方案, 并进行了小批量测试验证
- 已经完成大尺寸光敏探头研制项目的投标, 合同基本确定, 尽快开展管子采购的二次招标
- 测试系统:
 - 暗箱已经基本定型, 生产了一个样品, 需等管型确定再做微调
 - 需要增加测试电子学及其备份, 完成了询价



谢谢大家!
