

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





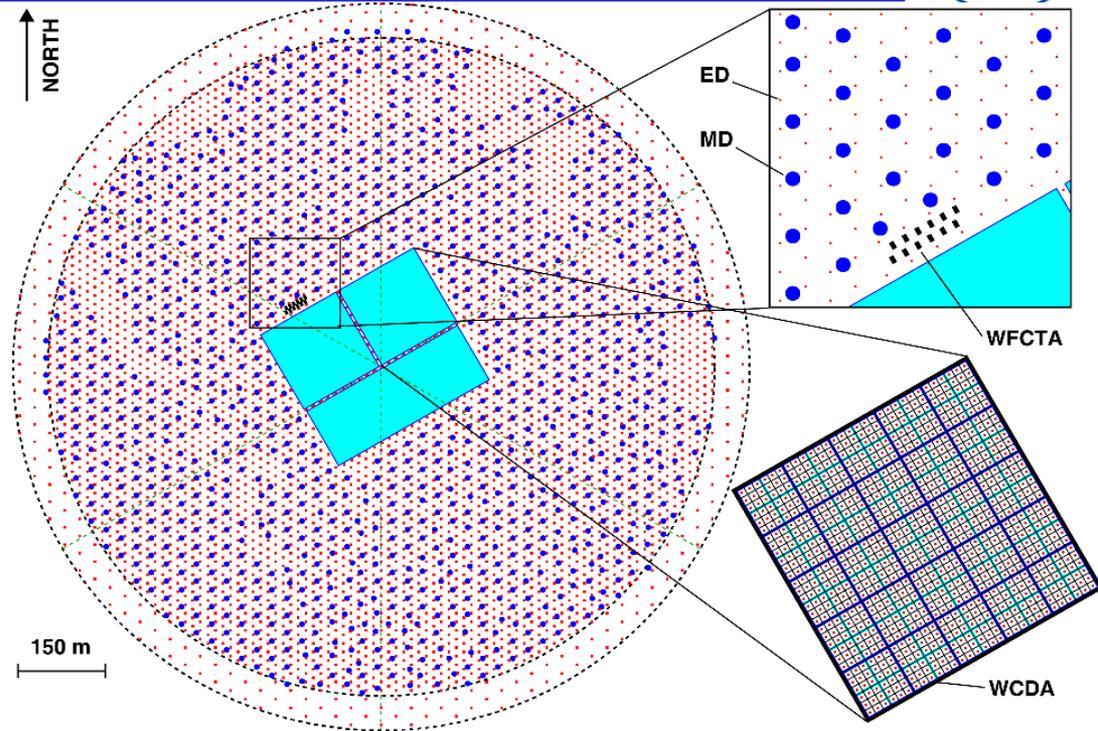
内容

- 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:

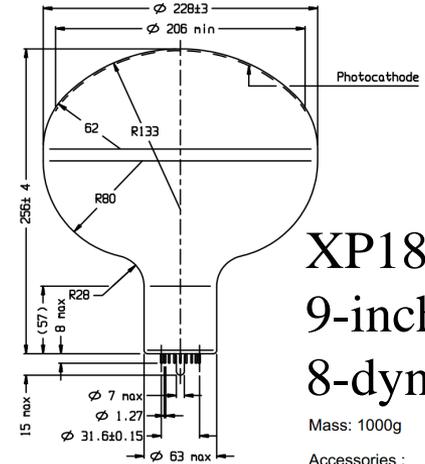
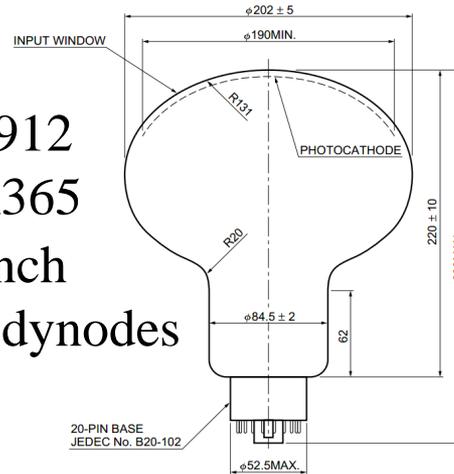
光阴极面积大
时间响应快
噪声水平低

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

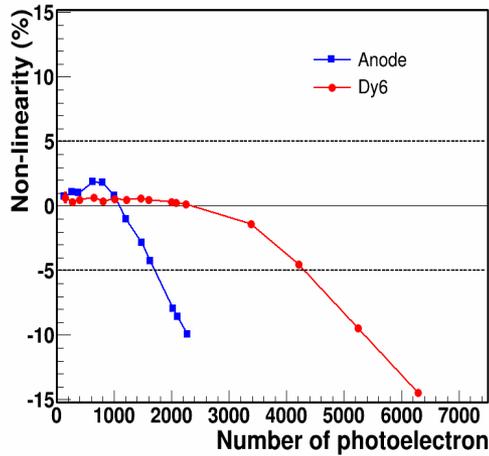
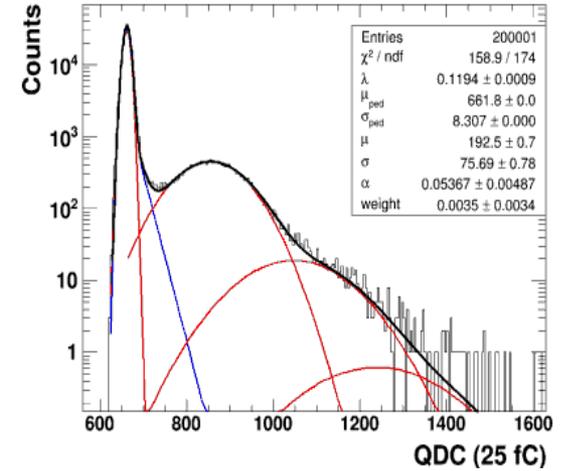
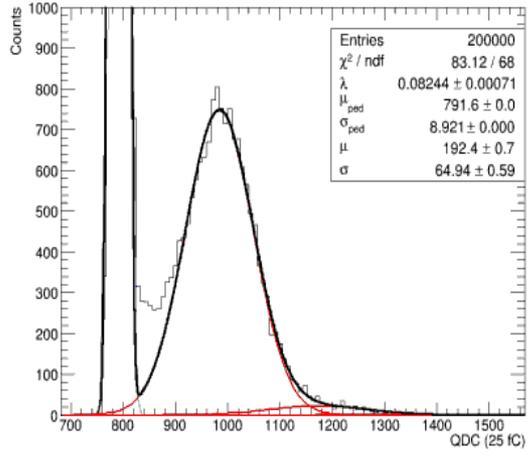
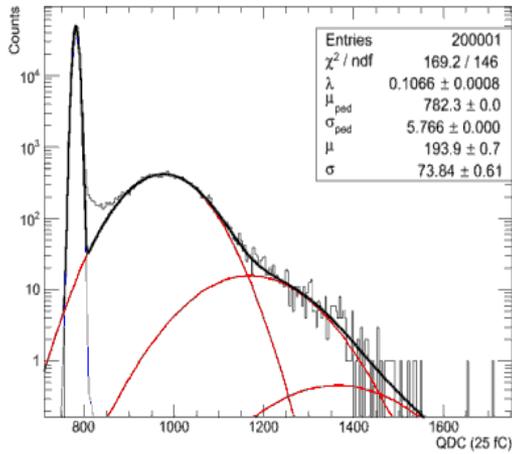


XP1805
9-inch
8-dynodes
Mass: 1000g
Accessories :
Socket : FE2019

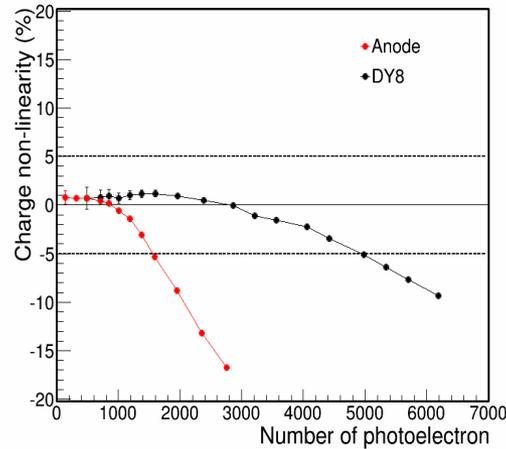
XP1805基本性能参数

| 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 |

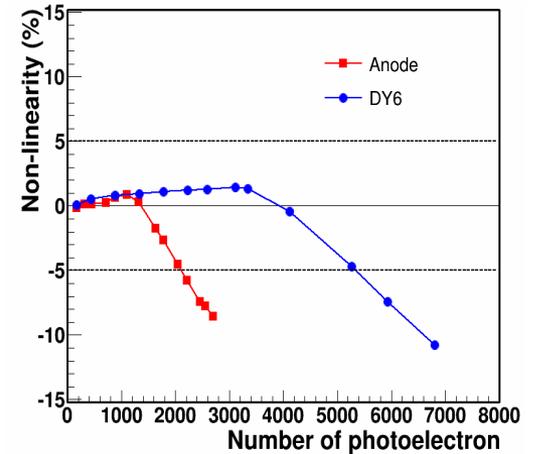
WCDA 分压电路设计



R5912



CR365



XP1805

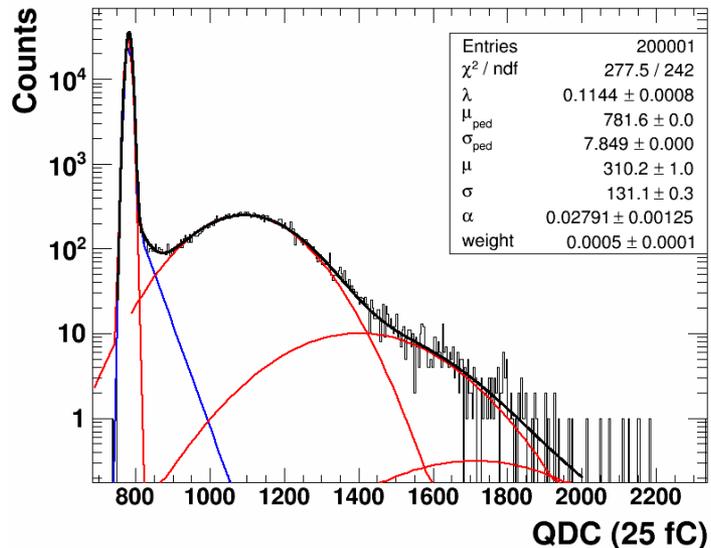


WCDA PMT性能对比

| 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 |

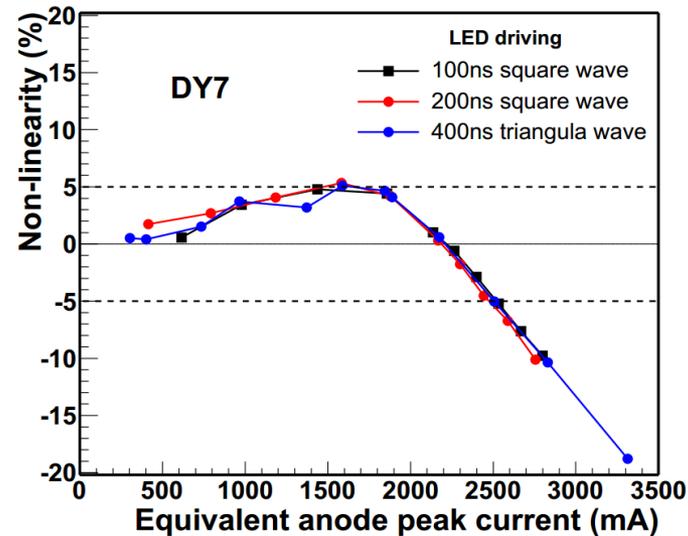
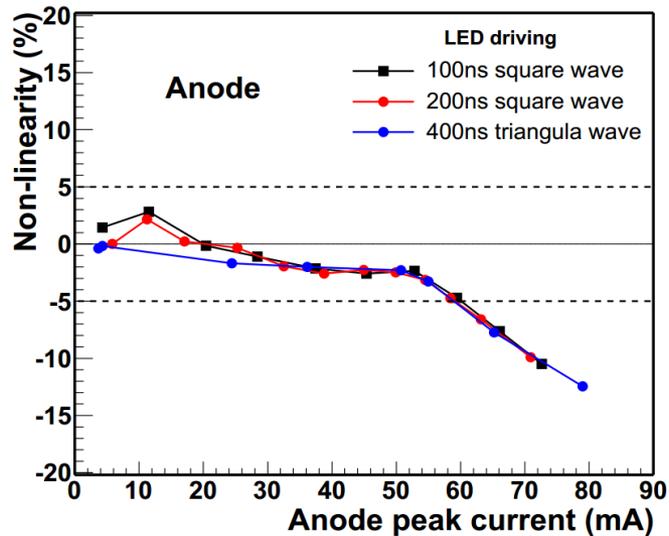
对每种管型均设计出符合要求的分压器

MD 分压器设计



R5912, CR365和XP1805均能满足非线性要求

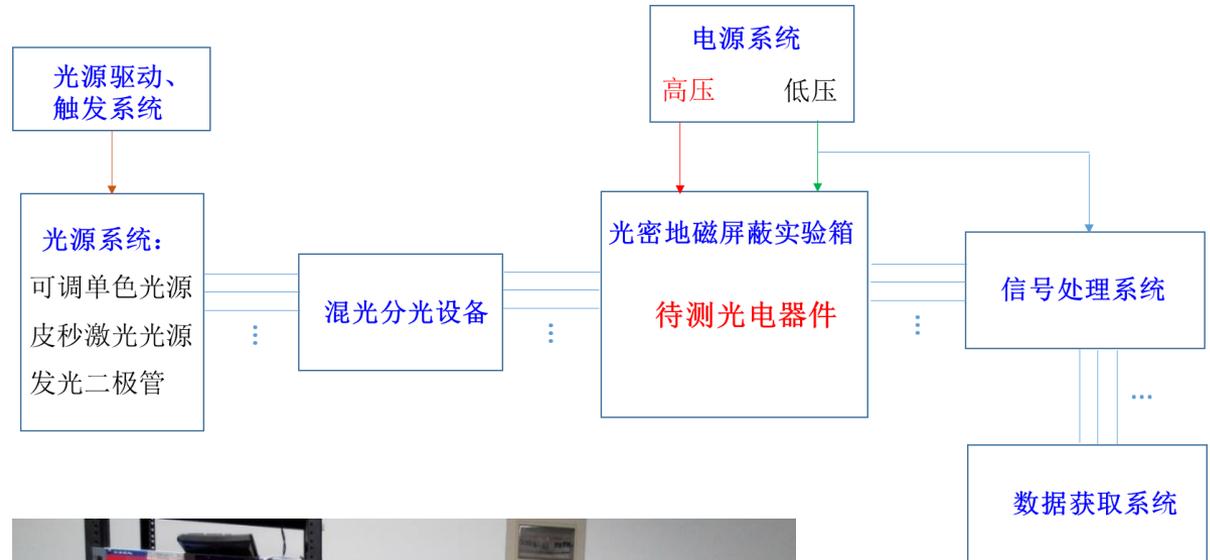
与XP1805相比, CR365一致性较好



PMT批量测试系统

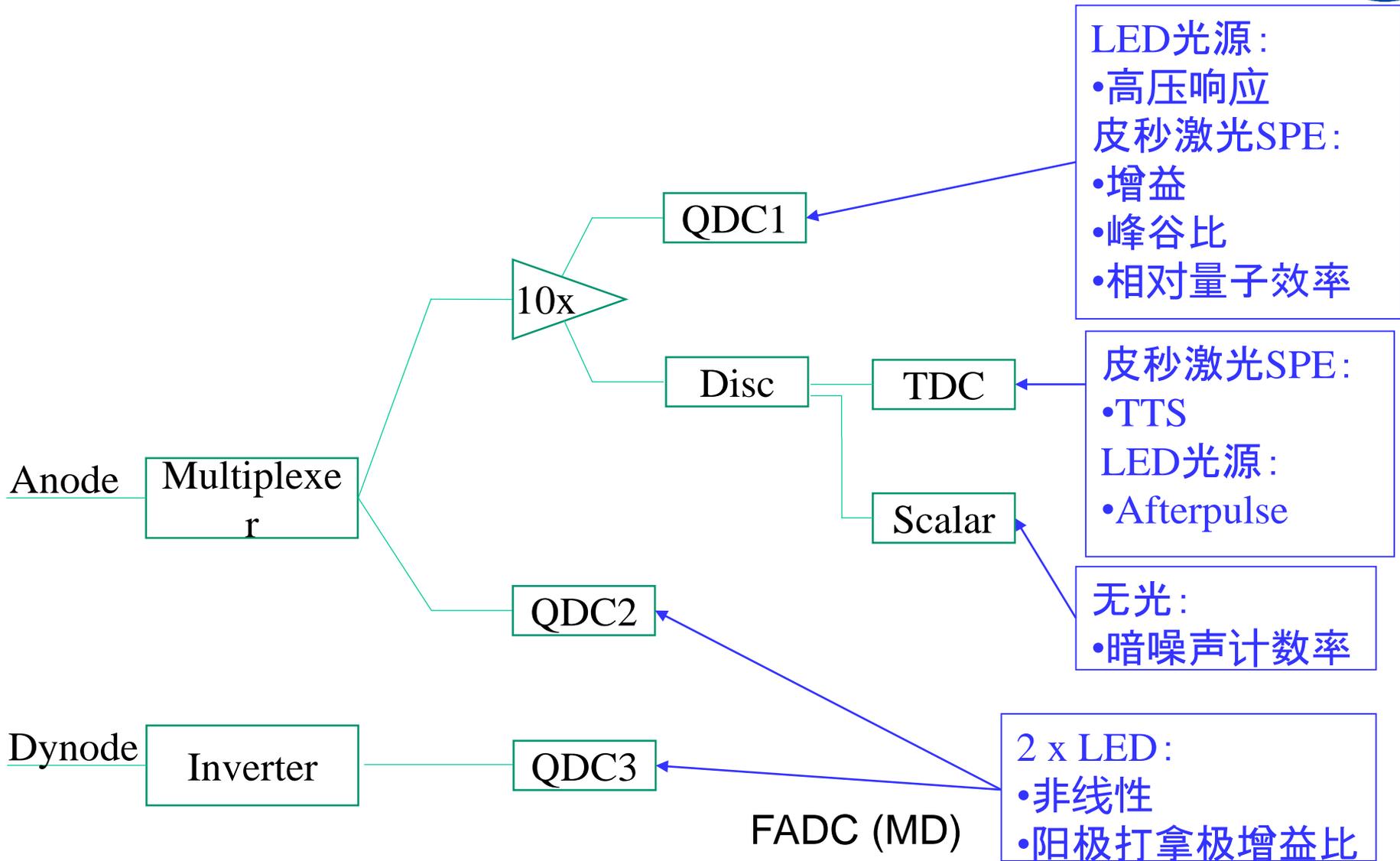
测试内容:

- 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

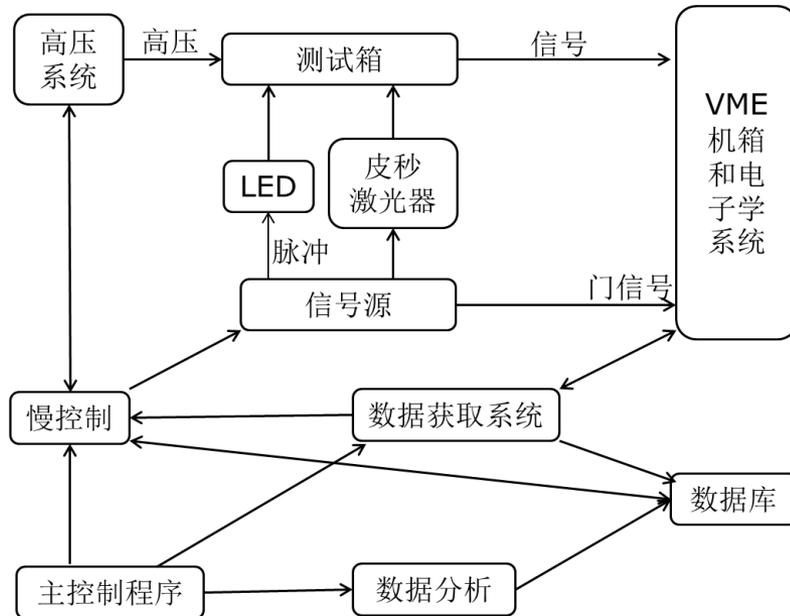


* 要求WCDA与MD尽量采用相同的测试设备与方案
* 自动化

信号处理系统



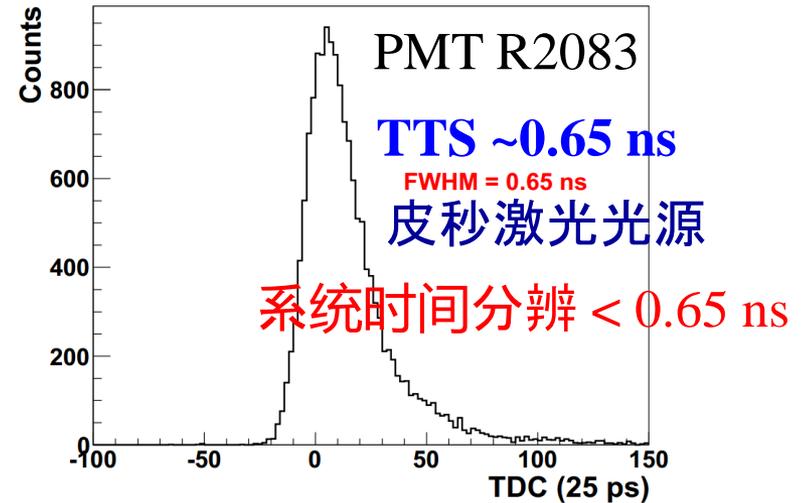
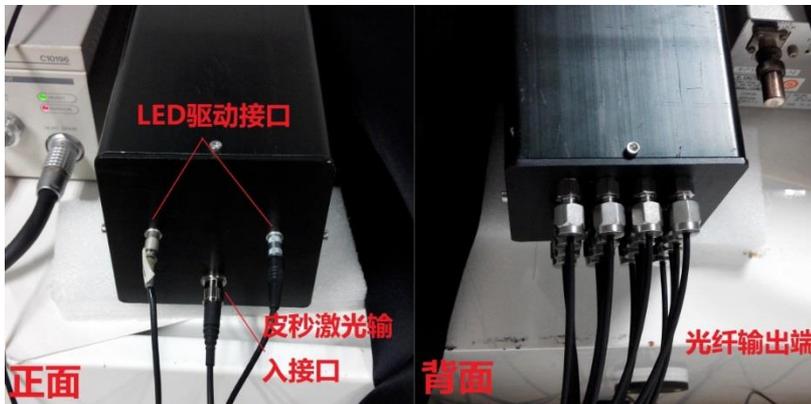
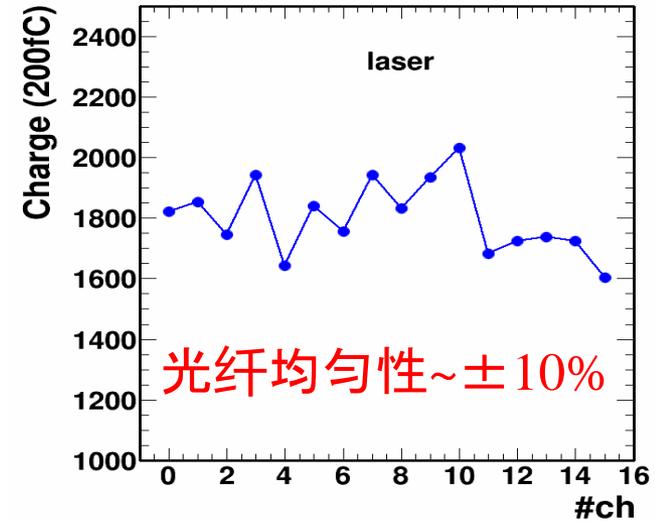
控制与数据获取系统



- 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

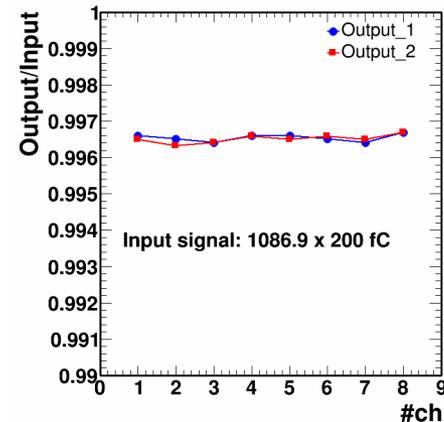
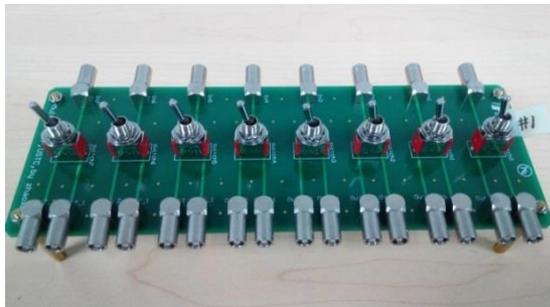
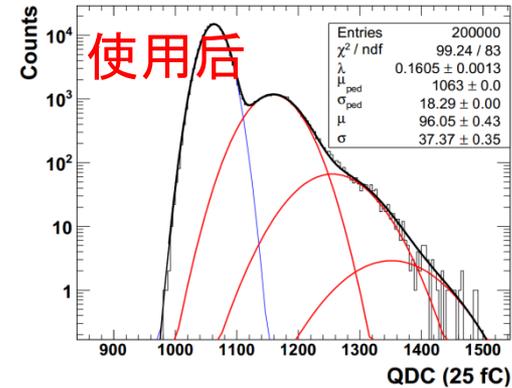
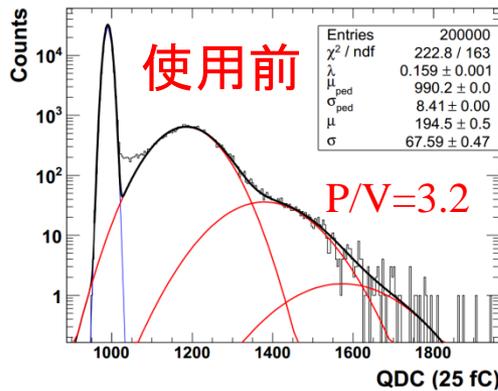
- 皮秒激光光源 + LED
 - 皮秒激光光源: 单光电子性能测试, 时间性能测量
 - LED: 非线性测试, 后脉冲比例测试
- 混光: 不同光源之间切换
- 分光: 多只PMT同时测试



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

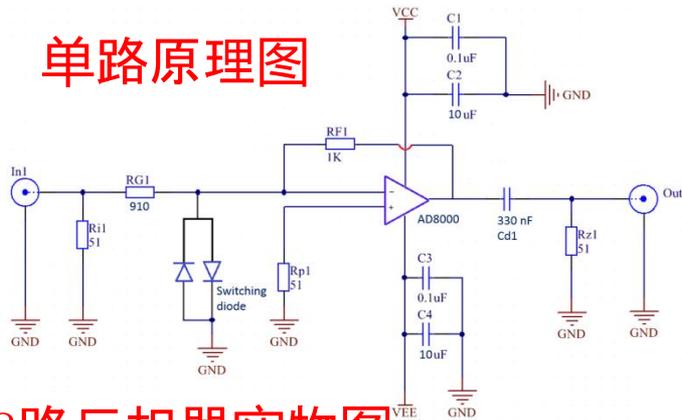
Spliter电阻分流测试结果



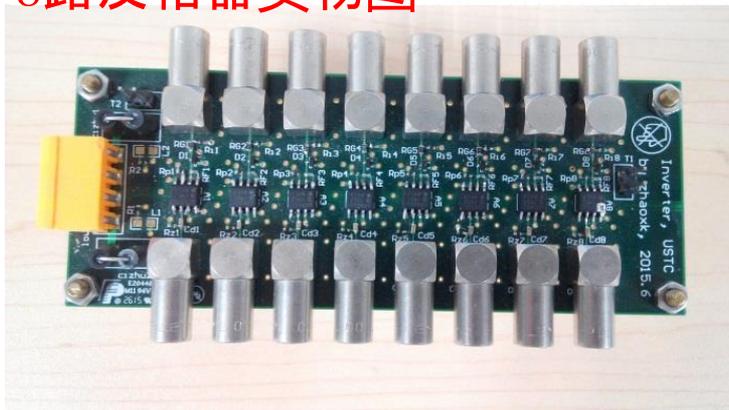
多路反相器

- 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)

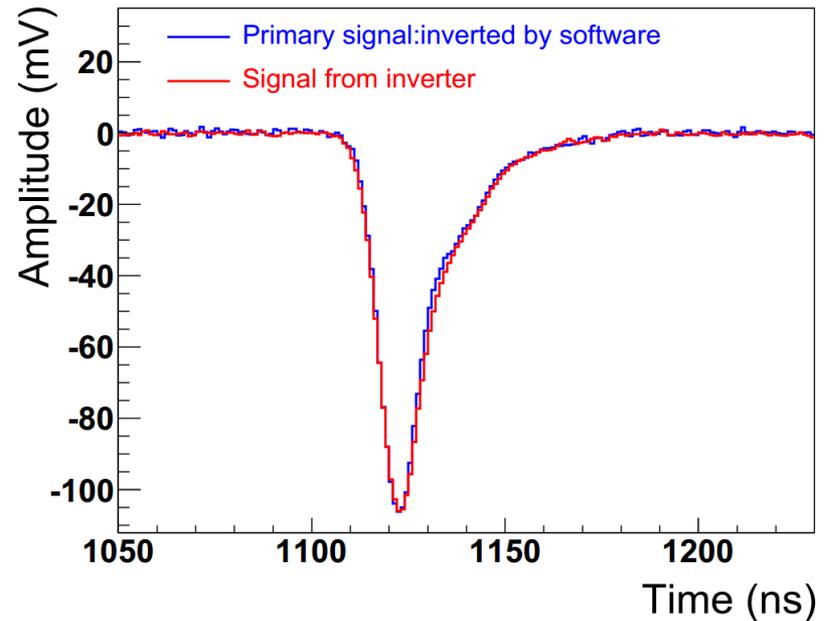
单路原理图



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：

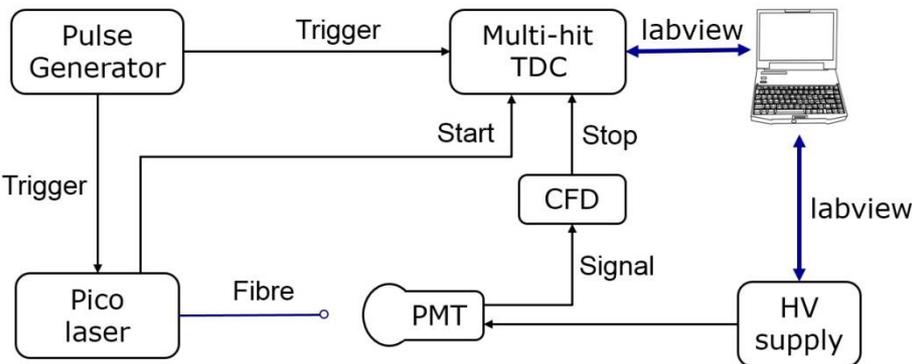
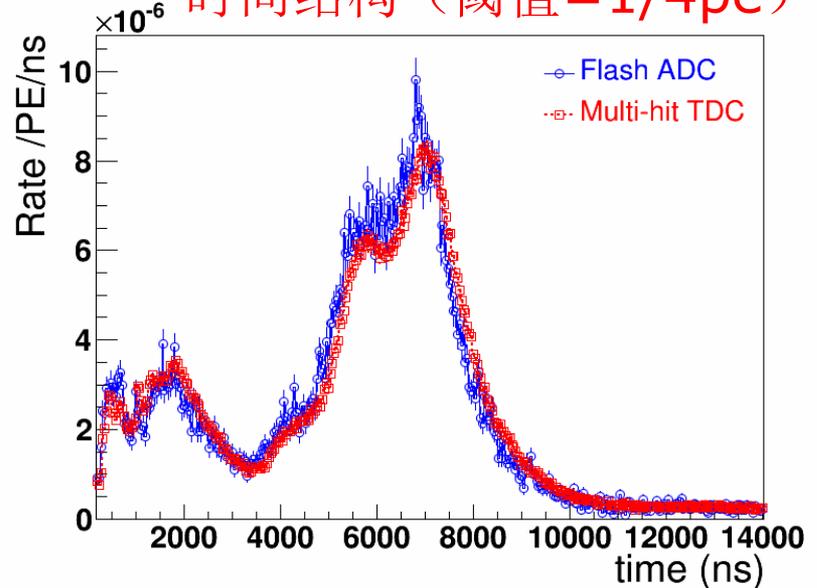
- 延迟门电荷积分
 - 数据采集快, 简单
 - 信息量少
 - 门宽范围有限
- 数字波形分析
 - 信息量多
 - 数据采集慢
 - 数据量大
 - 分析较复杂

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

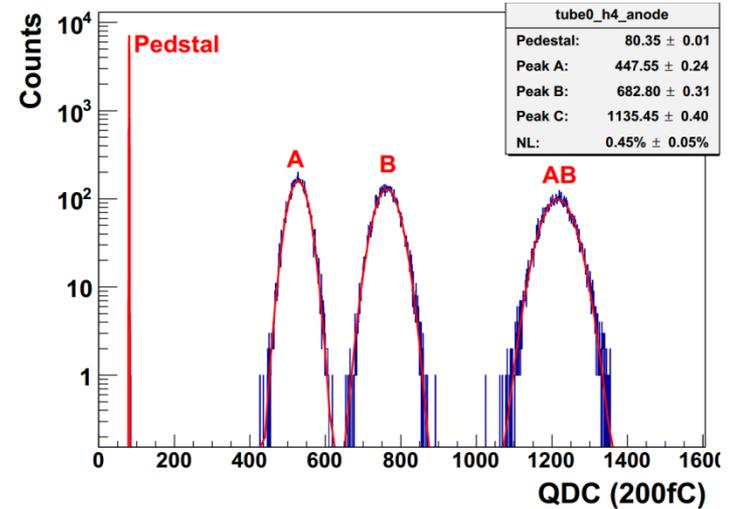
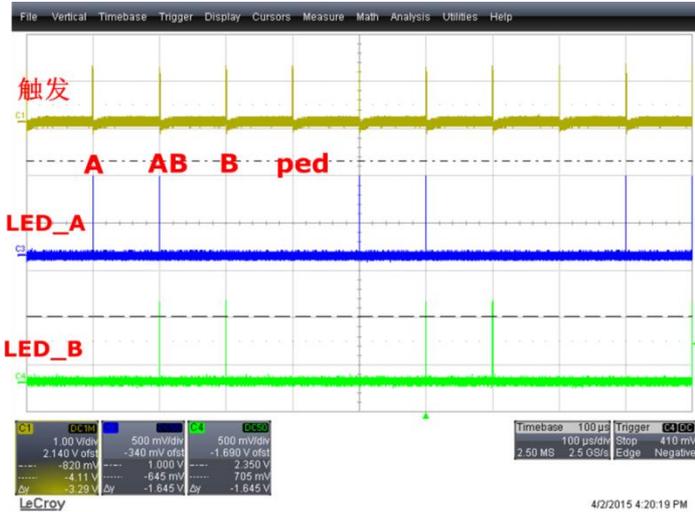
R5912结果

时间结构 (阈值=1/4pe)

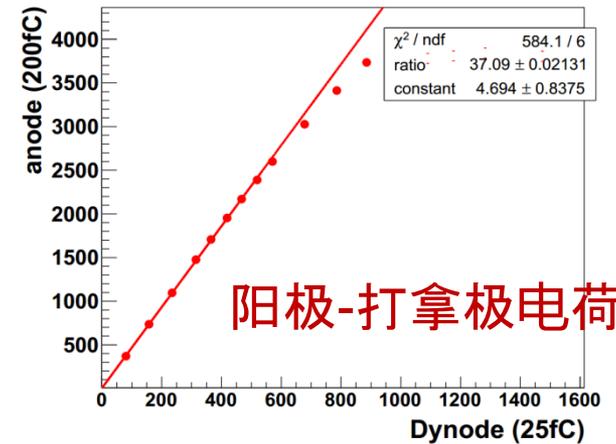
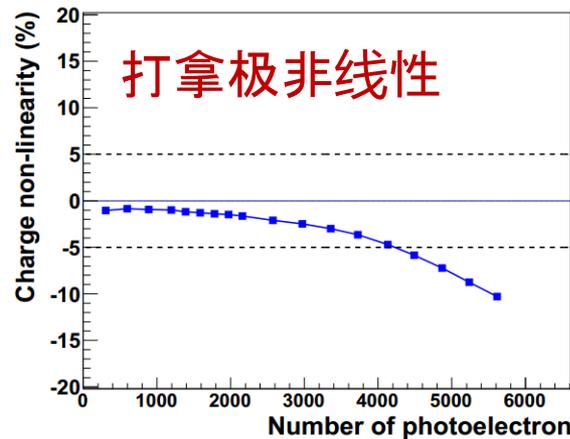
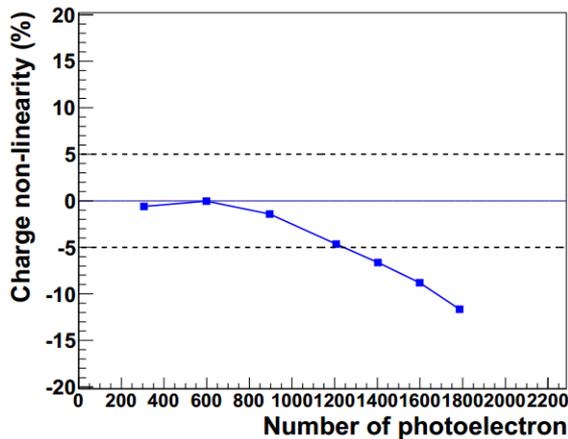


非线性测试

- 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!
