



LGAD读出电子学

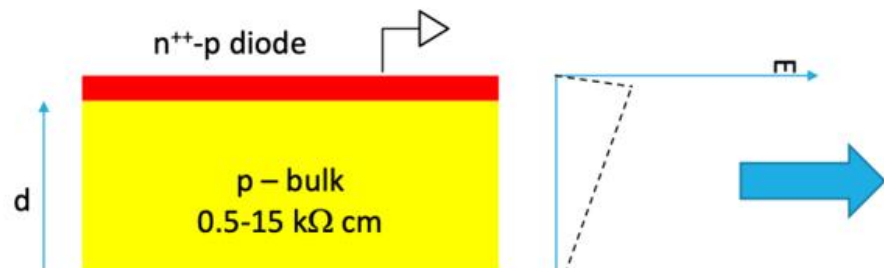
金丽燕¹, 王博¹, 李响¹, 赵梅², 梁志均², 樊云云², 严琪², 胡坤^{1*}

1. 山东大学前沿交叉科学青岛研究院; 2. 中国科学院高能物理研究所

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会

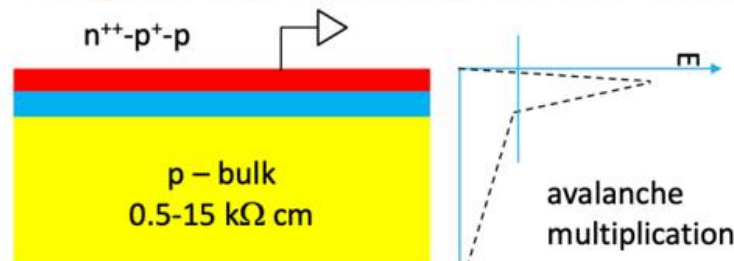
2026年8月11日, 河南登封

一般的 PIN 结传感器



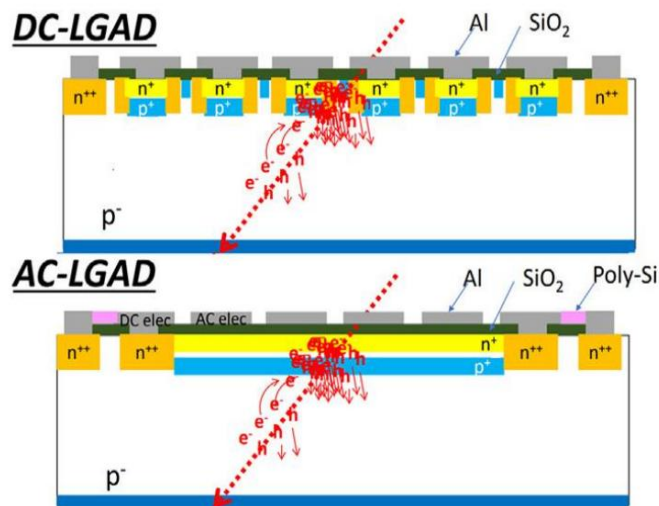
低增益雪崩硅传感器

P+ gain layer on top of PIN diode



LGAD 优势:

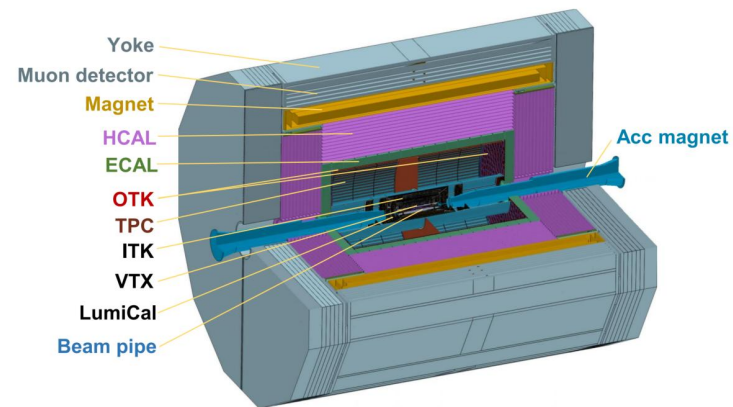
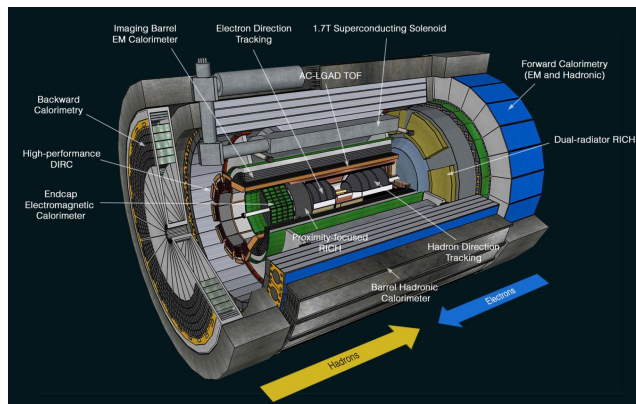
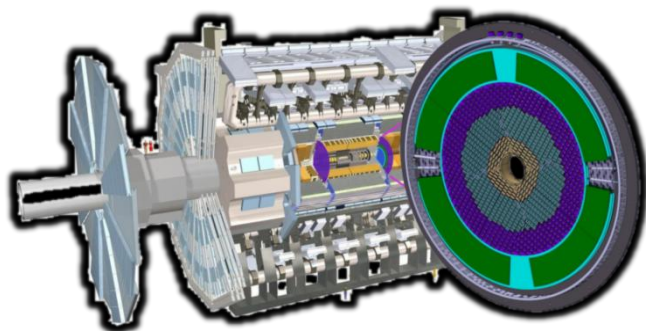
1. 信噪比大;
2. PN结薄;
3. 抗辐照性能好
4. 上升沿快 (~500 ps);
5. 中等增益 (10-50);



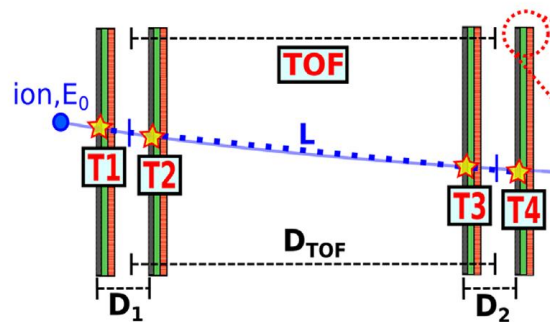
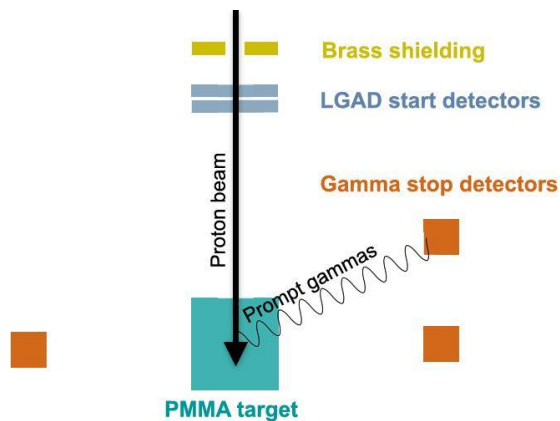
LGAD 结构图

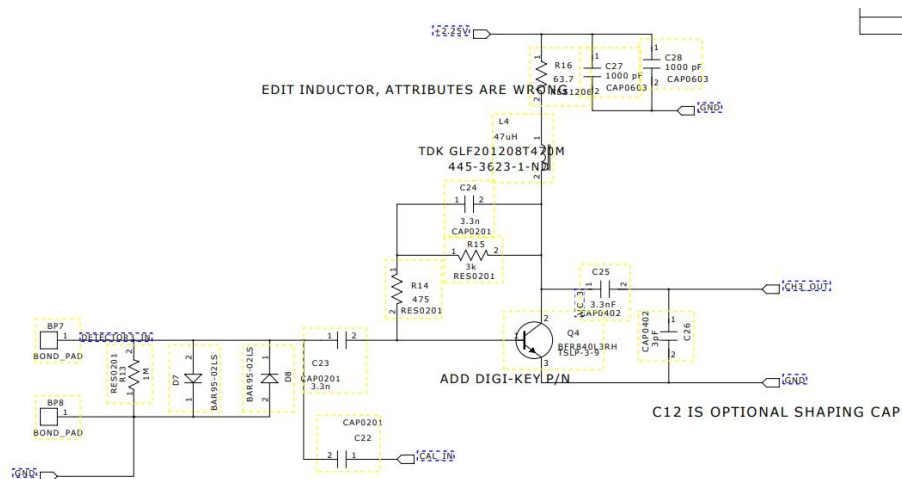
- DC-LGAD: 直流读出, 有较大的死区
- AC-LGAD: 增加了一层绝缘层, 交流耦合读出, 无死区, 提高空间分辨率

1、高能物理领域：ATLAS-HGTD、ePIC-TOF、CEPC-OTK

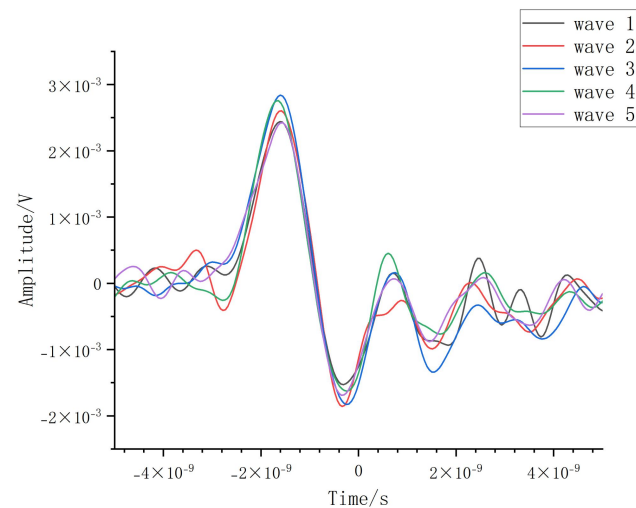
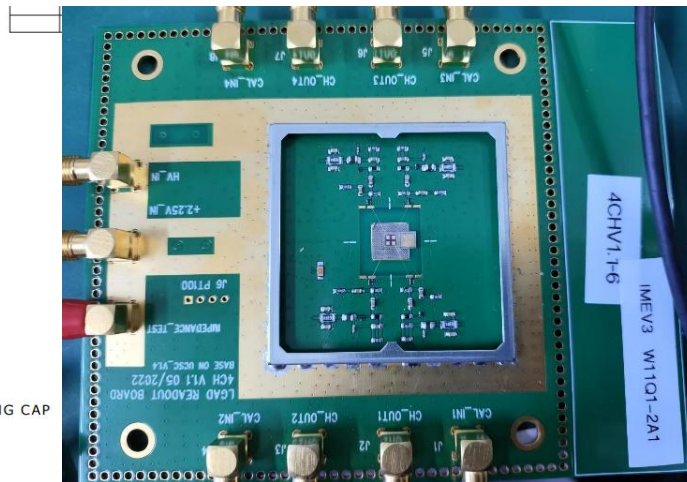


2、医学物理：质子放疗、质子成像





AC-LGAD前放电路



AC-LGAD前放输出信号

LGAD信号特点:

上升沿快 (500ps-1ns) ;

脉宽窄 (~2ns) ;

增益小 (信号幅度<10mv) ;



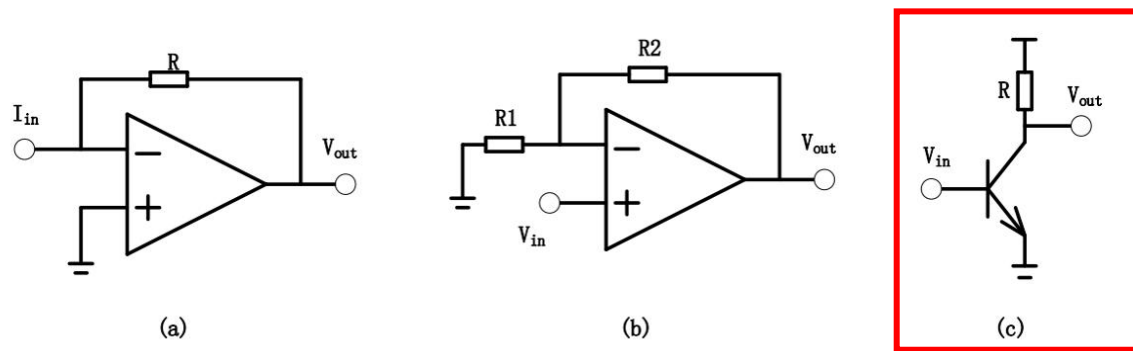
读出电子学需求:

高带宽;

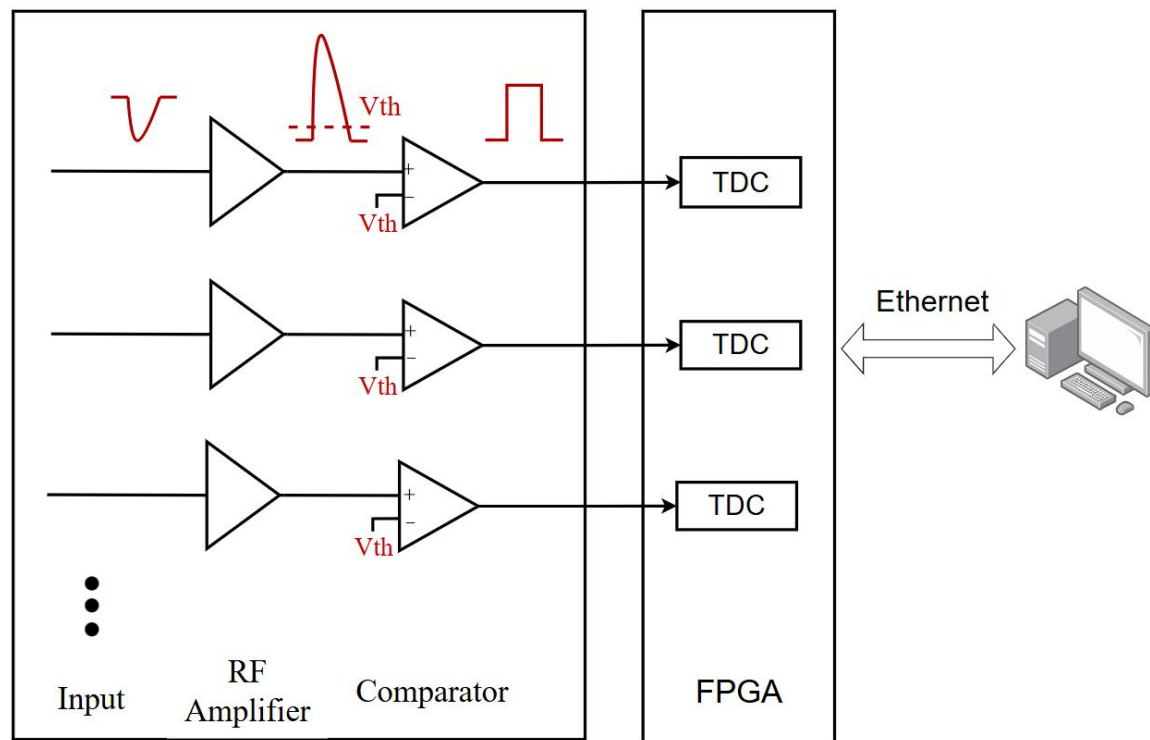
快速响应;

高放大倍数;

1. 法国巴黎IJCLAB: Altiroc芯片;
2. 中国科学技术大学: LATIC芯片;
3. 布鲁克海文国家实验室BNL: EICROC芯片;
4. 西北工业大学&高能所



- a. Transimpedance Amplifier (TIA): $V_{out} = I_{in} * R$;
- b. Voltage Amplifier (VA): $V_{out} = (1 + R_2/R_1) V_{in}$;
- c. Wideband Radio-Frequency Amplifier (RF): fixed gain.**



放大器: 选用ADL5545;

带宽 30 MHz - 6 GHz;

放大倍数 ~24dB;

DAC: 提供阈值 V_{th} ;

鉴别器: 当放大器输出信号 $>V_{th}$ 时被触发;
输出差分信号 (抗干扰能力强);

TDC: 抽头延迟链型时间数字转换器(TDL-TDC),
基于 FPGA 中 CARRY 8 实现;
测量输入信号的上升沿和下降沿;

上位机: 通信、处理数据;

PGA-103+ : 带宽 4GHz, 上升沿 600ps-800ps;

BGA420 : 带宽 3GHz, 上升沿 500-600ps;

BGA427 : 带宽 3GHz, 上升沿 400-500ps;

PHA-23LN+ : 带宽 2GHz, 上升沿 600ps;

ADL 5536 : 带宽 1GHz, 上升沿 700ps-900ps;

MAR-6+/ADL5545 : 带宽 6GHz, 上升沿 550ps, 脉宽<2ns.



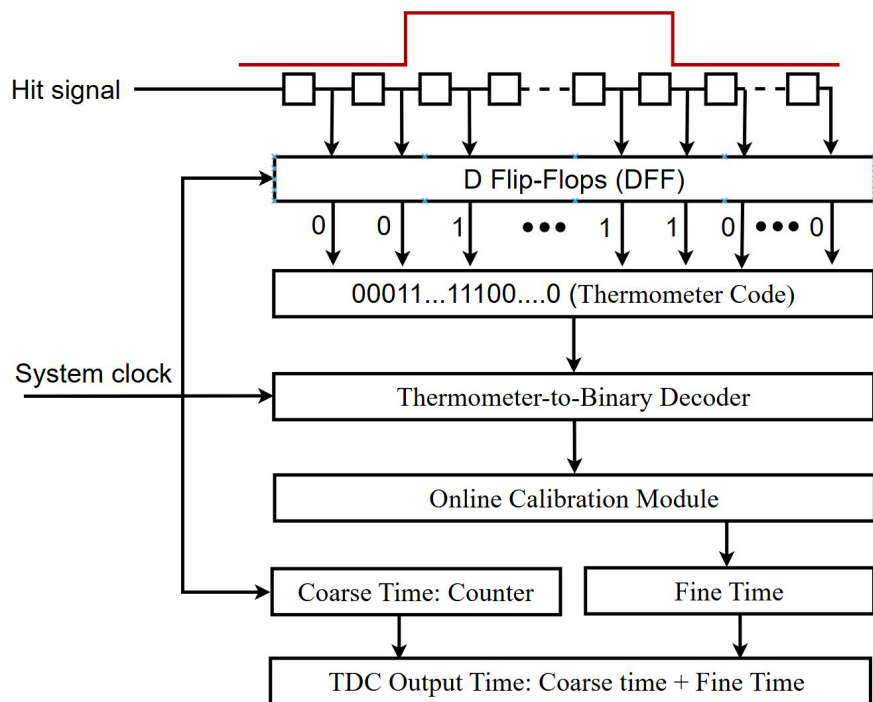
AC-LGAD
探测器



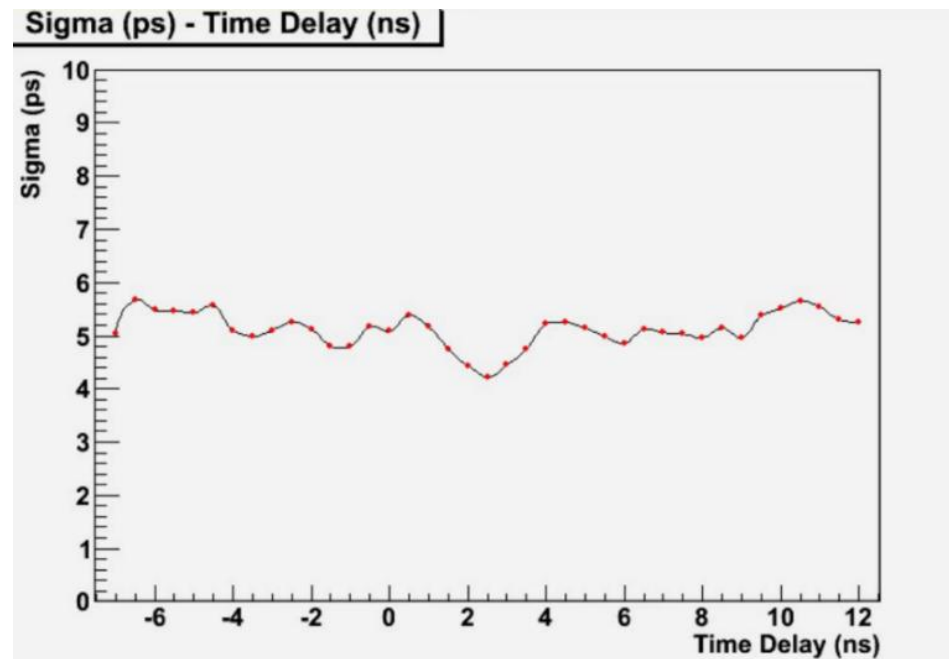
AC-LGAD 测试箱



AC-LGAD 前置放大电路测试结果



TDL-TDC 原理



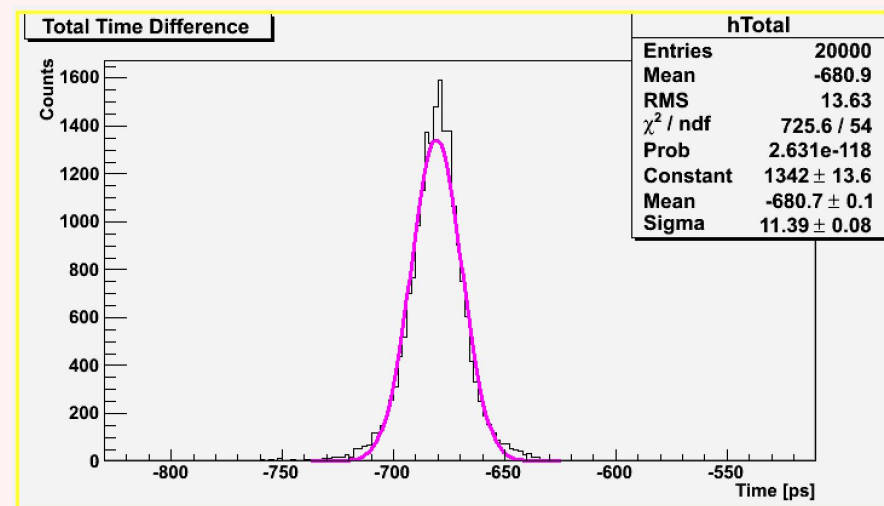
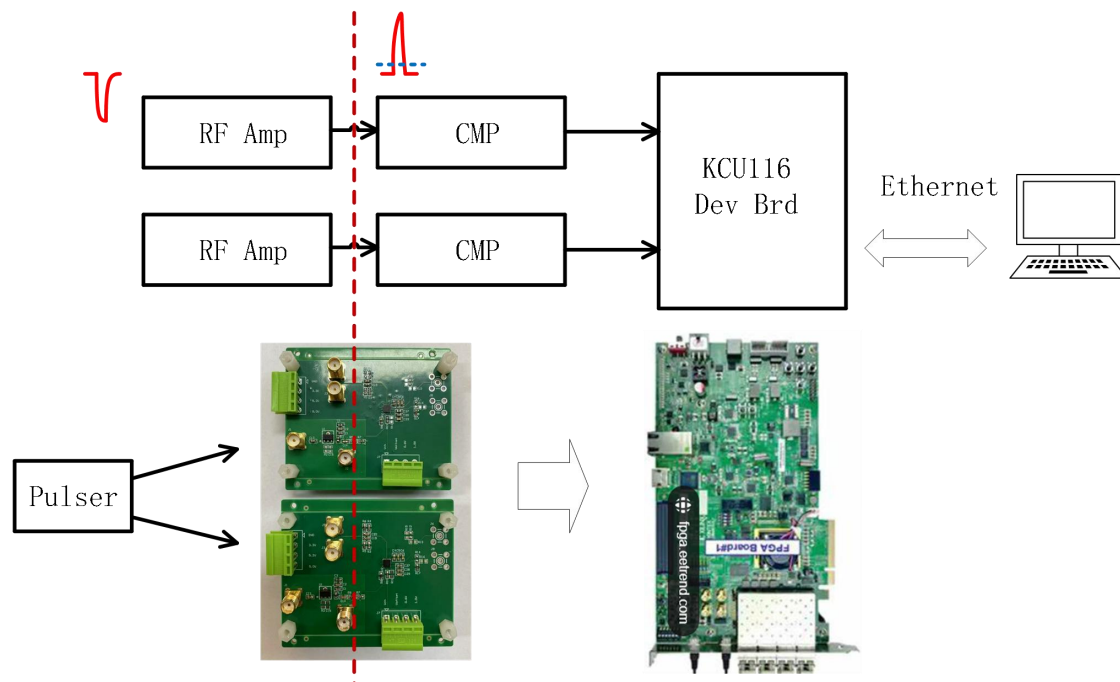
双通道TDC时间测量精度6ps以内

TDL-TDC: Tapped Delay Line Time-to-Digital Converter, 抽头延迟链型时间数字转换器

粗时间: 利用系统时钟和一个计数器测量, $T_{Coarse} = nT_{CLK}$ 。

细时间: 触发信号在延迟链中传输, 由D触发器采样, 经过编码器、在线校准, 得到细时间。

2通道LGAD读出系统原型



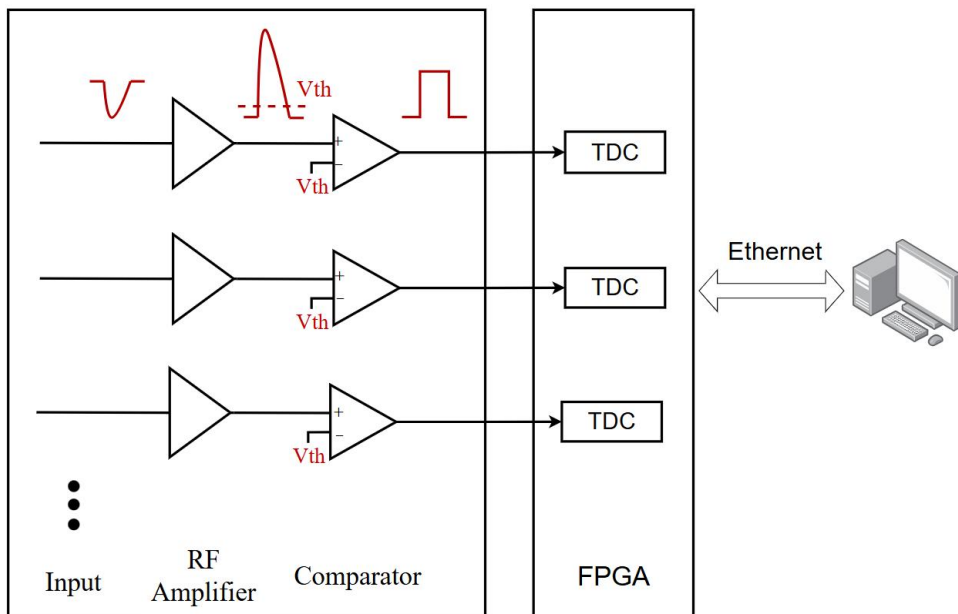
两通道系统时间测量精度~11 ps

双通道TDC时间测量精度11ps, 可算得单通道时间测量精度约为 $11/\sqrt{2} \approx 8\text{ps}$

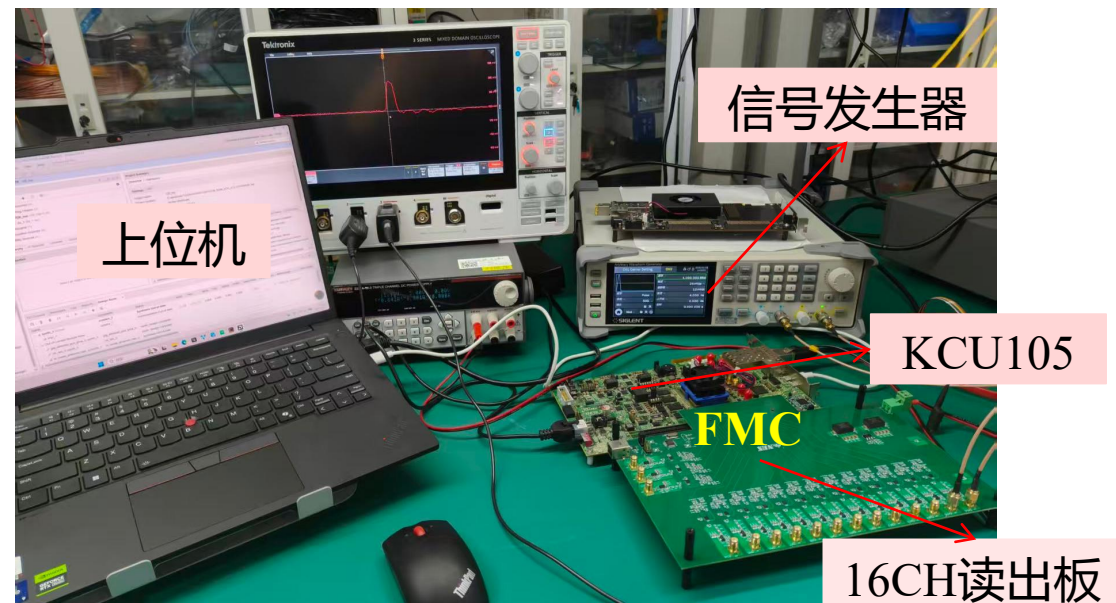
16通道LGAD读出系统



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

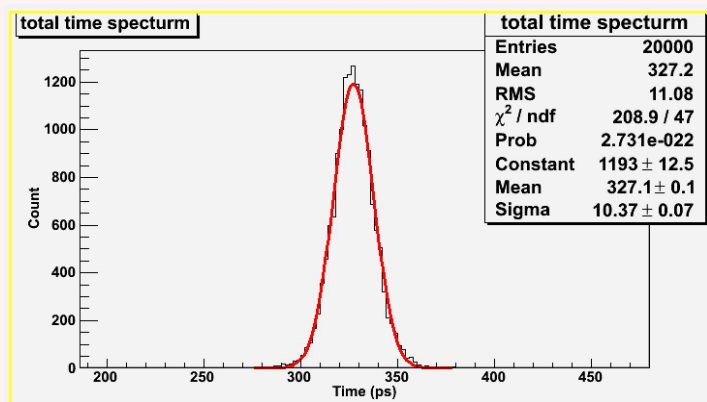


16通道电子学读出系统(16CH FEE)构成示意图

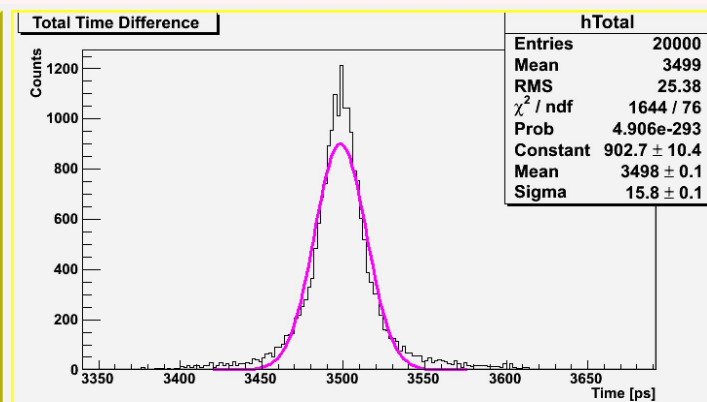


16通道FEE系统电子学测试示意图

电子学
测试结果



TOA sigma~10ps

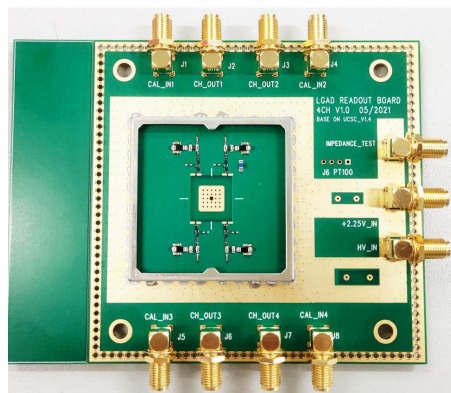


TOT sigma~15ps

16CH FEE探测器测试结果



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY



Laser

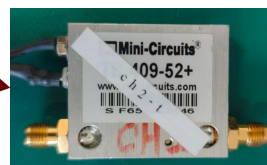
Preamplifier

AC-LGAD

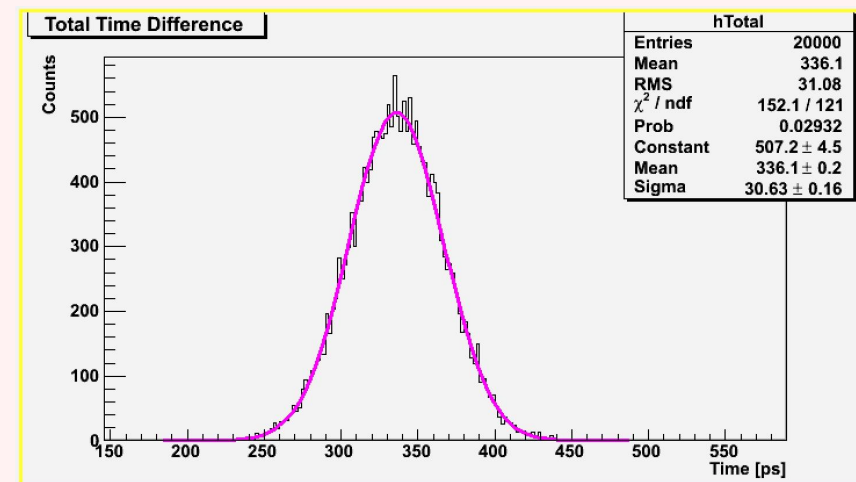
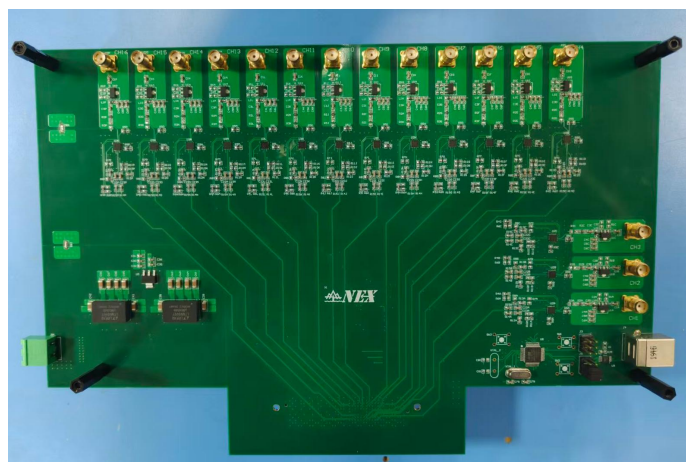
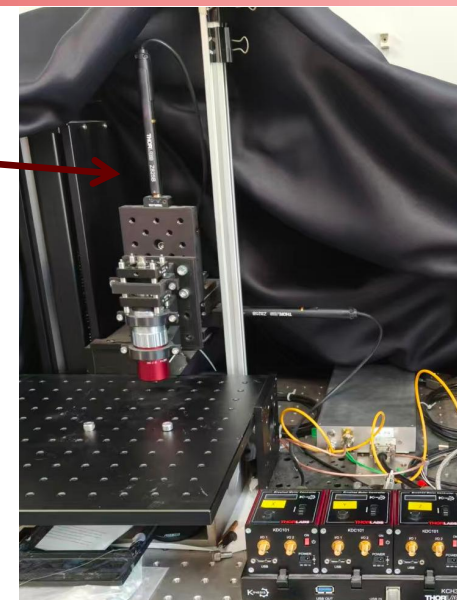
Adapter Board

Signal

External Amplifier



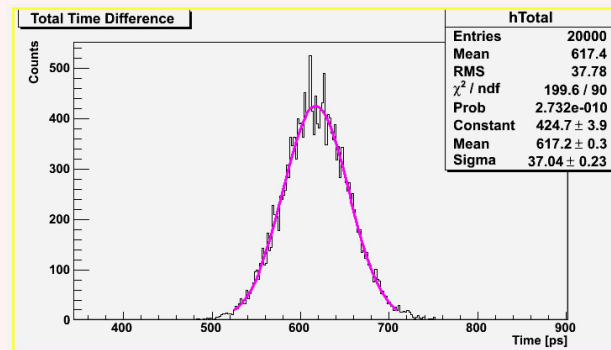
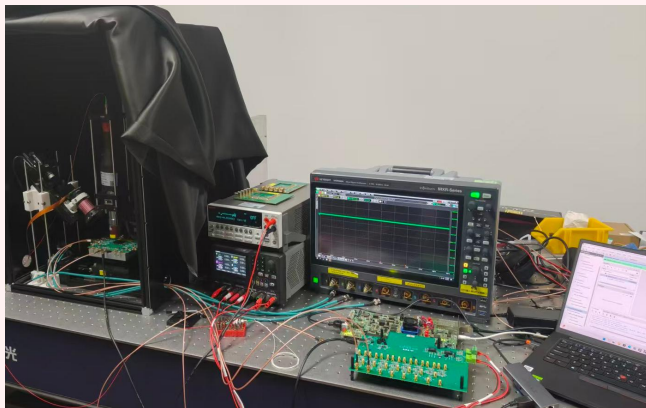
16-CH FEE



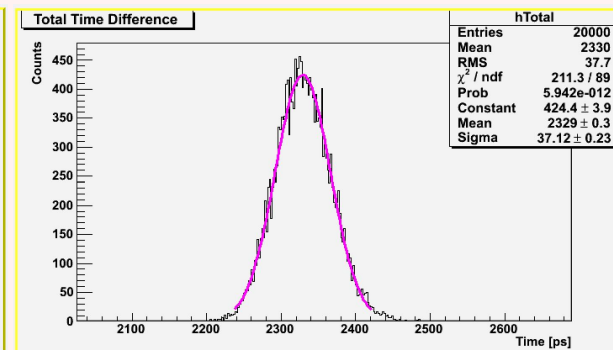
TOA sigma $\sim$ 30ps

16CH FEE探测器测试结果

激光测试

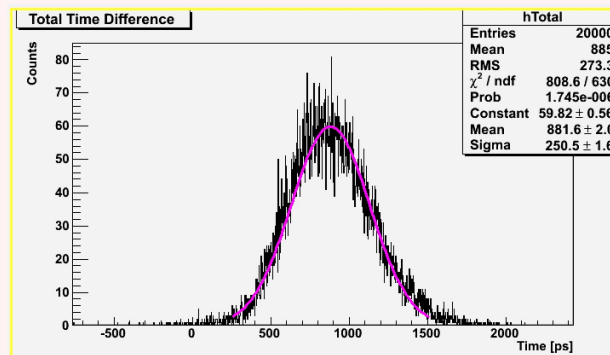
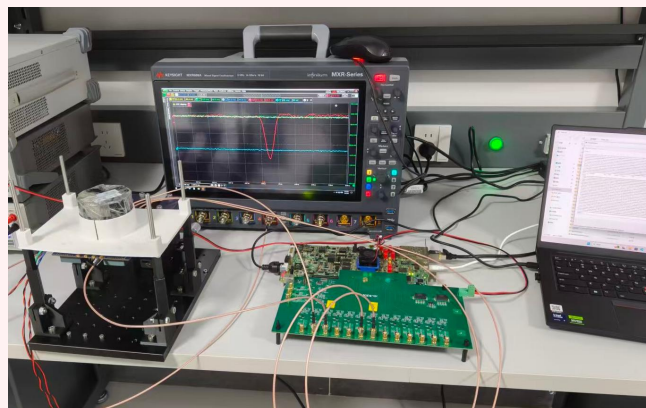


Laser test-TOA $\sim 37\text{ps}$

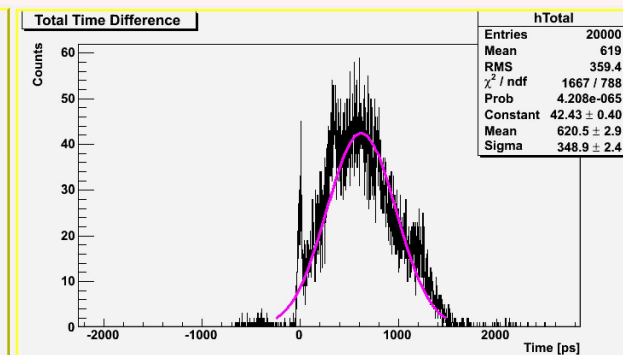


Laser test-TOT $\sim 37\text{ps}$

β 源测试



Sr90 test-TOA $\sim 251\text{ps}$



Sr90 test-TOT $\sim 349\text{ps}$

利用现有数据，目前正在探索TOT修正TOA的方法

总结

1. 设计了16通道的LGAD电子学读出系统，包括放大、甄别、TDC等部分，兼具TOA和TOT测量功能。
2. 实现了与AC-LGAD探测器的联调测试，使用激光作为信号源时，得到了较好的时间分辨 ($\sim 30/\sqrt{2}$ ps单通道)。
3. 使用 Sr90 作为信号源时，时间分辨有较大提升空间，目前正在探索TOT修正TOA的方法，以获得更好的时间分辨。

谢谢！