

高能质子实验站 粒子能量测量设备

李梦朝

On behalf of project group

中国散裂中子源
中国科学院高能物理研究所

2025.08.15 • 郑州

mzli@ihep.ac.cn



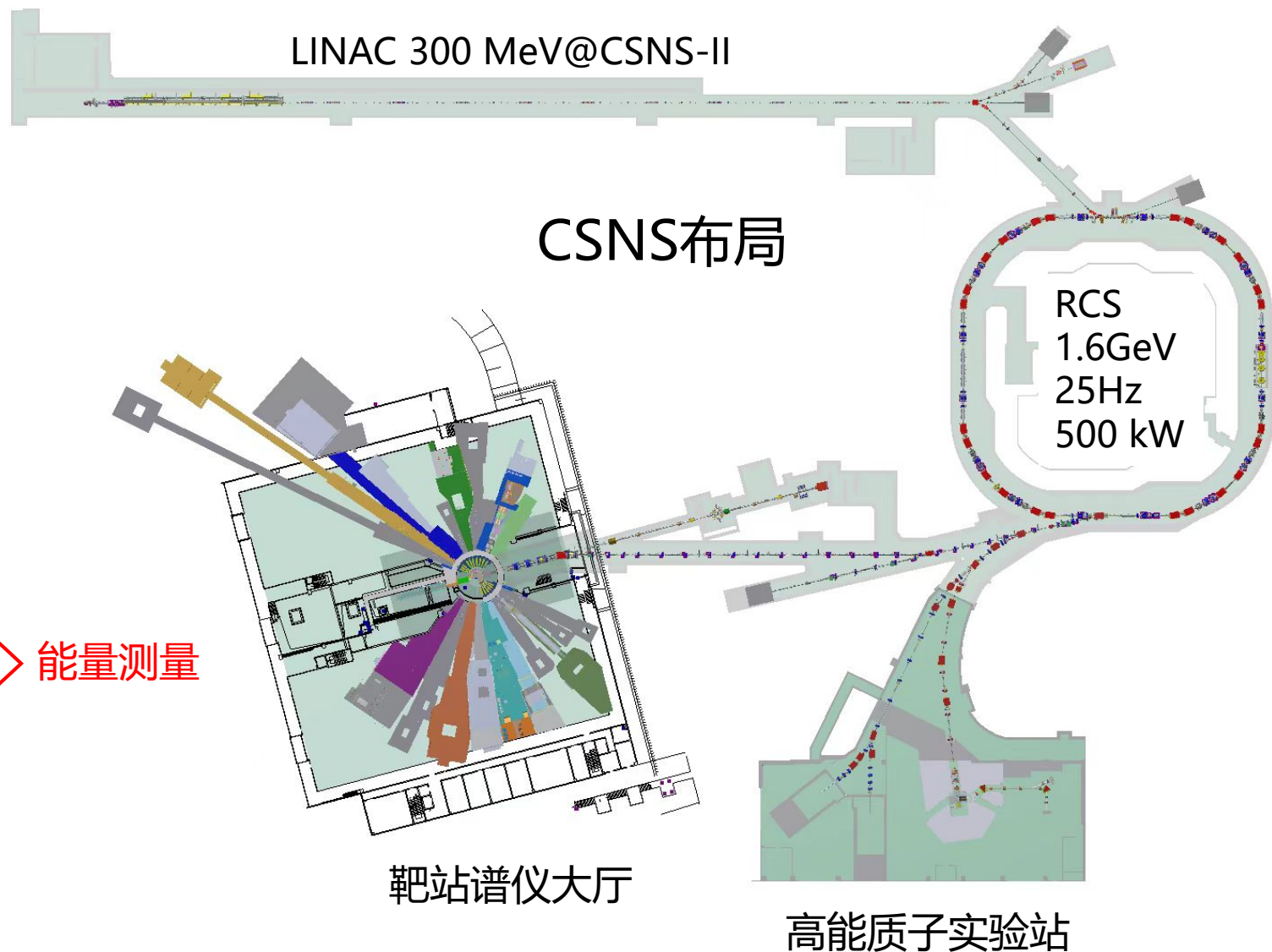
1.高能质子实验站 (HPES)

- CSNS二期规划建设的实验站之一
- 中国第一台1.6 GeV质子源
- 主要用于先进探测器的研发和测试

高能质子测试束参数

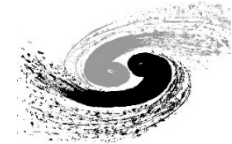
参数名称	设计指标
质子能量范围	0.8-1.6 GeV
质子脉冲频率	>1000 Hz
质子流强	>2*10 ⁶ n/cm ² /s
质子空间分辨	<10 μm

➡ 能量测量



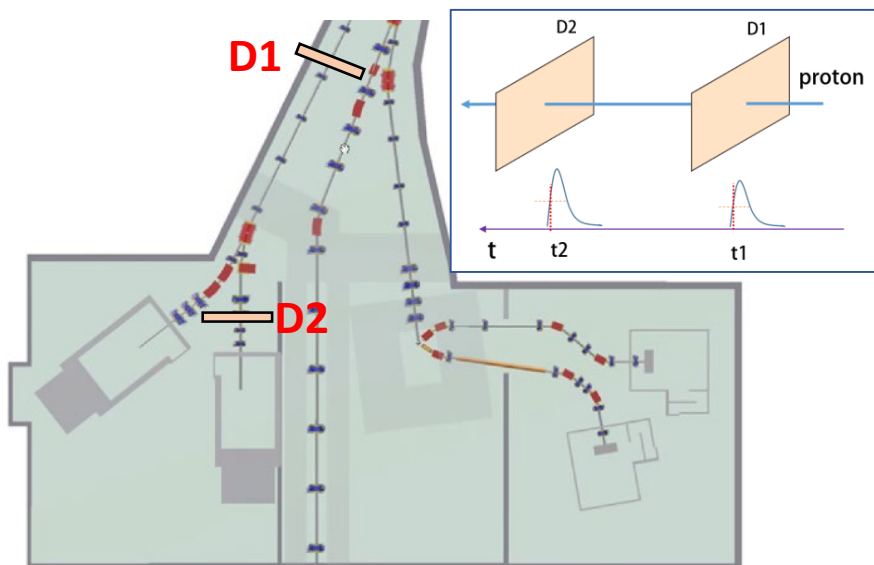
1.高能质子实验站 (HPES)

质子能量测量需求



质子通过降能器后，能量在800-1600MeV范围，为需求质子能量的用户提供能量参数，如量能器等。

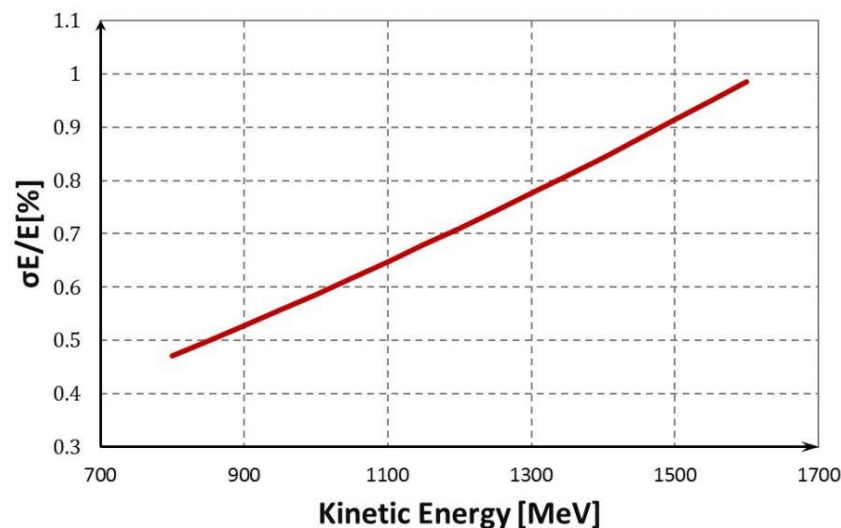
利用飞行时间法标定能量：**要求探测器时间分辨率小于100ps（能量分辨率好于1%），面积 2cm × 2cm**



质子能量测量方法：

$$V = \frac{L}{(T_1 - T_2)}$$

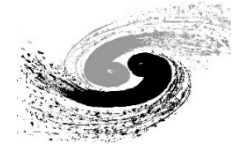
- 飞行时间测量
- 探测器D1 (RABT隧道) 和D2 (实验终端T2)
- 质子飞行距离约 40 m
- 飞行时间 $t_2 - t_1$ -> 质子动量



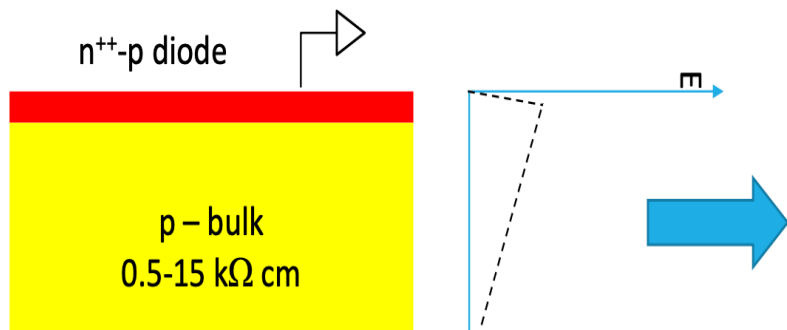
- 1.6GeV质子飞行时间143ns
- 800GeV质子飞行时间158ns
- 探测器时间分辨率 $\leq 100\text{ps}$

2.探测器设计方案

探测器选择: LGAD

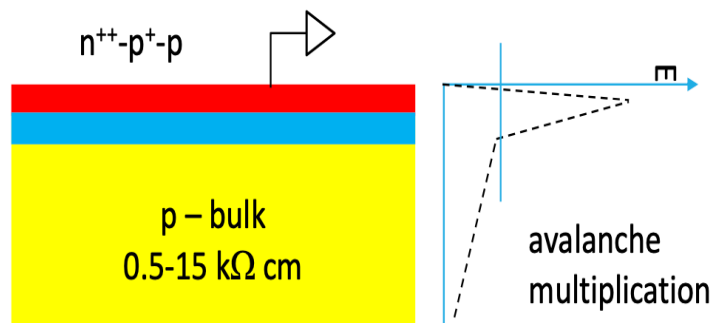


传统的 PIN 二极管

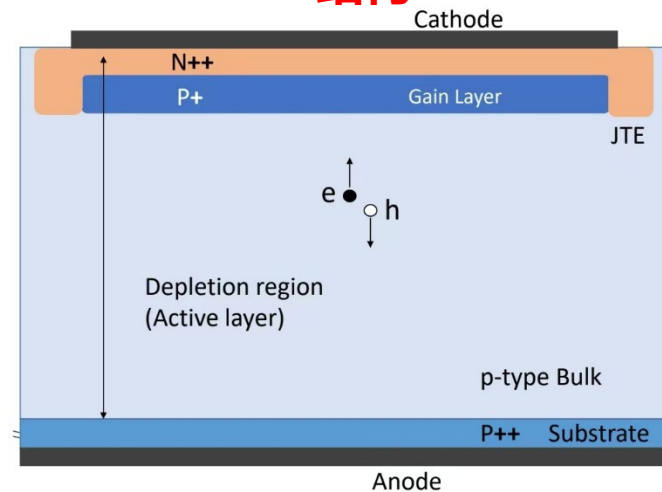


Low Gain Avalanche Diode

LGAD: P+ gain layer on top of PIN diode



LGAD结构



➤ 合适的增益(10-50)

- Modest gain to increase S/N
- High S/N, no self-triggering

➤ 薄的灵敏区/漂移区

- Reduce Landau contribution caused by ionization
- High drift velocity and decrease t_{rise}

$$\sigma_{\text{Jitter}} = \frac{N}{dV/dt} \approx t_{\text{rise}} / \left(\frac{S}{N} \right)$$

低增益雪崩二极管 (LGAD) :

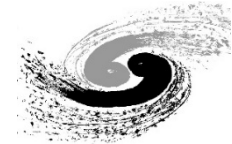
- 时间分辨率好 ~30ps @ 像素1.3mm
- 抗辐照性能强 $2.5e15 \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- 无暗计数

LGAD探测对象:

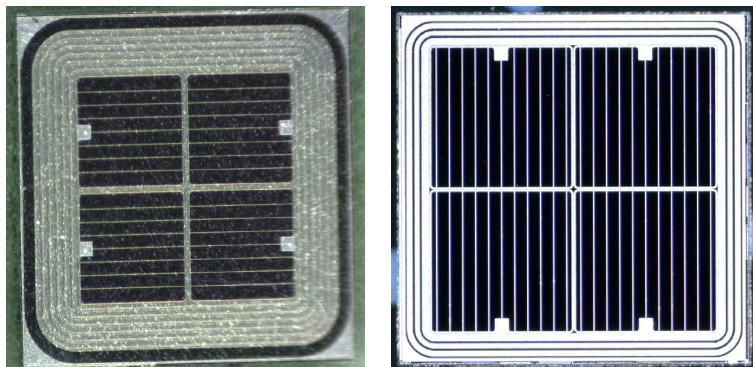
- 带电粒子探测: 质子、电子等, 效率大于99%
- 中子探测: 热中子 (镀转换模)、高能中子
- 光子探测: 红外-紫外、X-ray、 γ

2.探测器设计方案

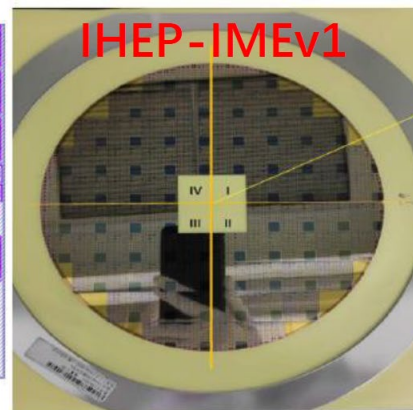
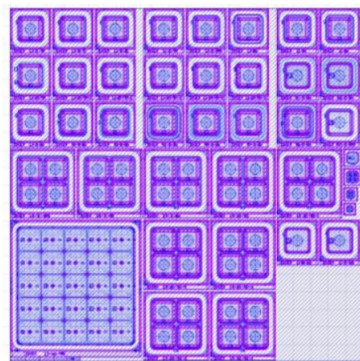
IHEP LGAD 研发时间线



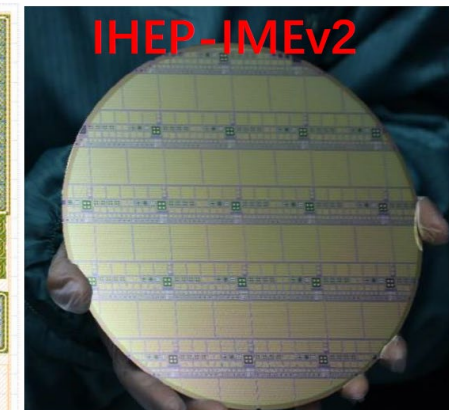
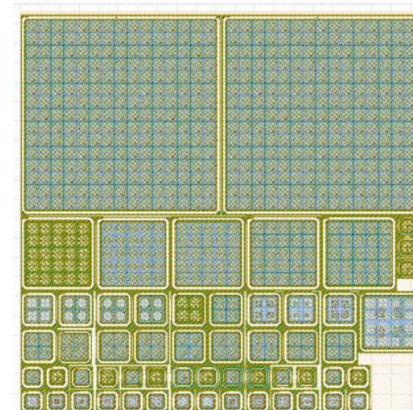
IHEP-NDL (2019)



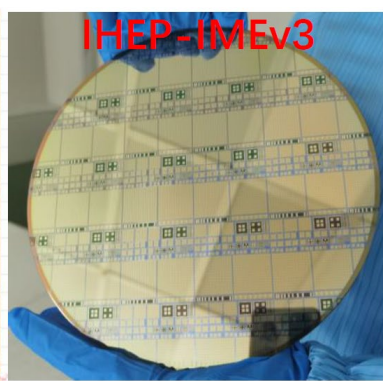
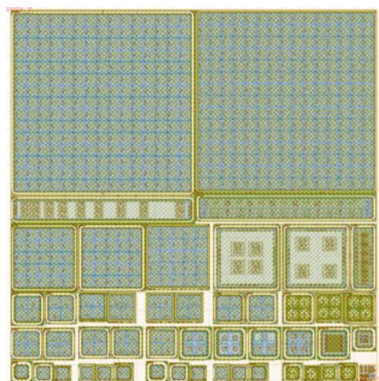
IHEP-IMEv1 (2020.9)



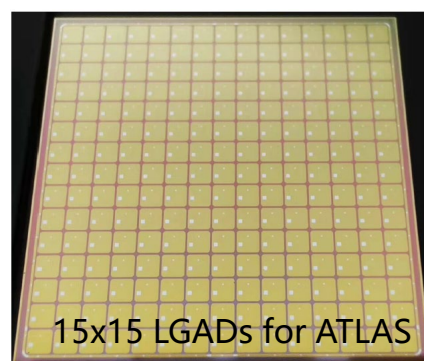
IHEP-IMEv2 (2021.6)



IHEP-IMEv3 (2022.5)



Pre-production for ATLAS (2023.7)

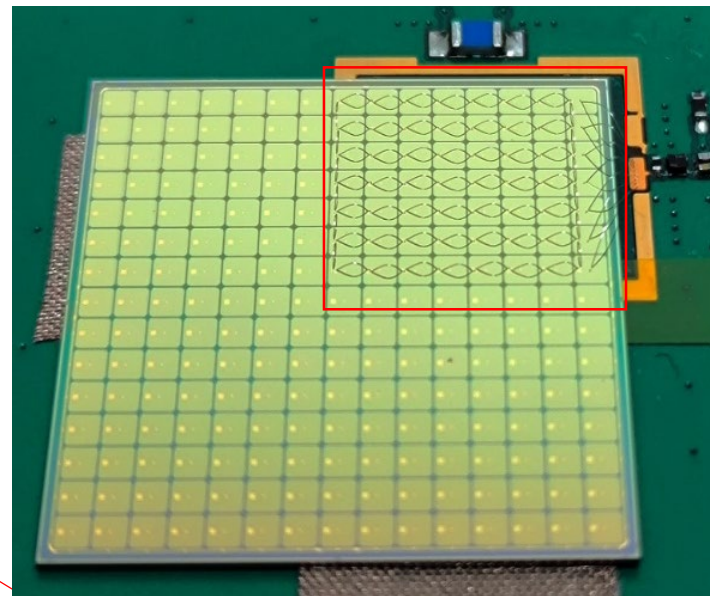
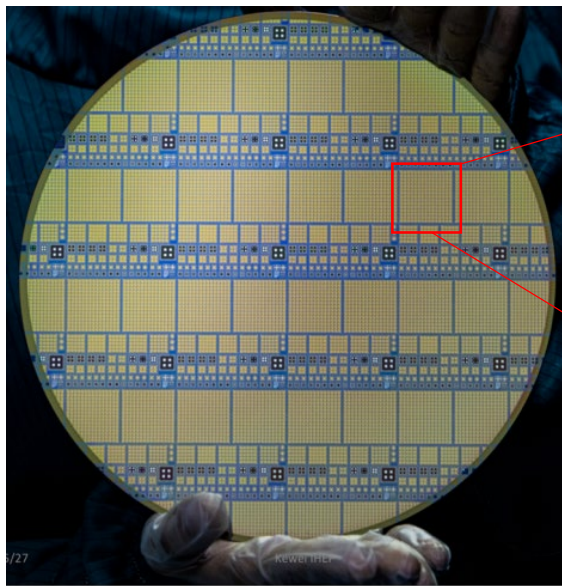
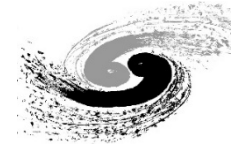


**Mass production
(2024.7) for ATLAS**

欧洲核子中心（CERN）首次采购中国产的半导体器件，打破日本滨松垄断

2.探测器设计方案

探测器选择: 2cm x 2cm LGAD



LGAD 探测器8寸晶圆

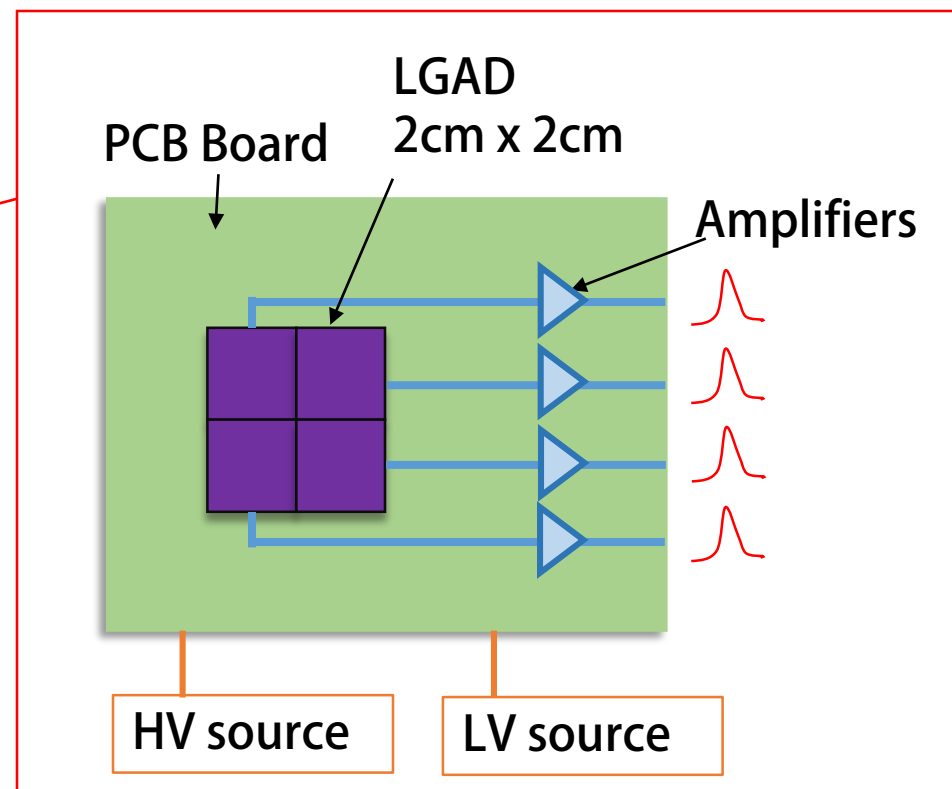
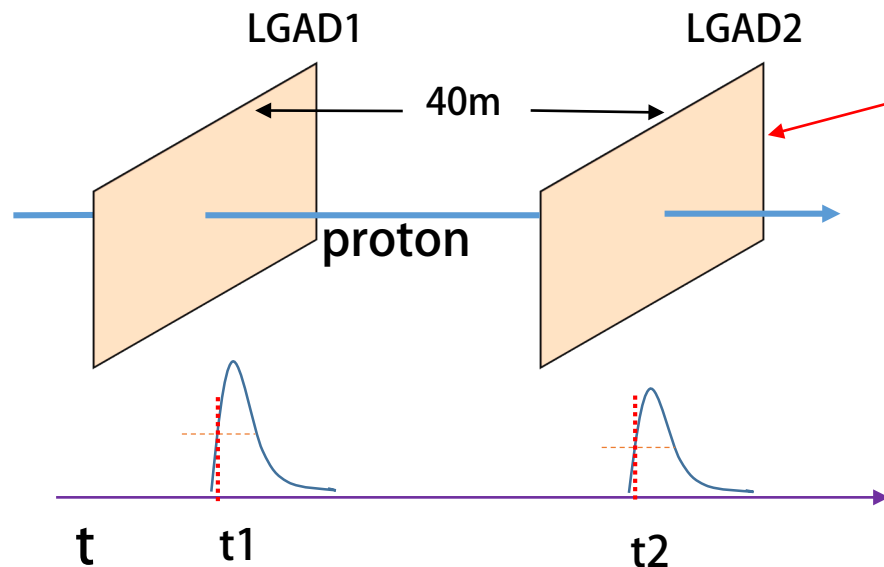
- IHEP独立设计
- 抗辐照工艺
- 于微电子所IME流片生产
- 国产器件

大面积LGAD器件

- 15×15阵列
- 整体尺寸: ~ 2cm×2cm
- 器件厚度 ~ 300 μm
- 信号宽度 ~ 5ns
- 目标时间分辨率 ≤ 100ps

2.探测器设计方案

LGAD Energy Measurement System (LEMS)



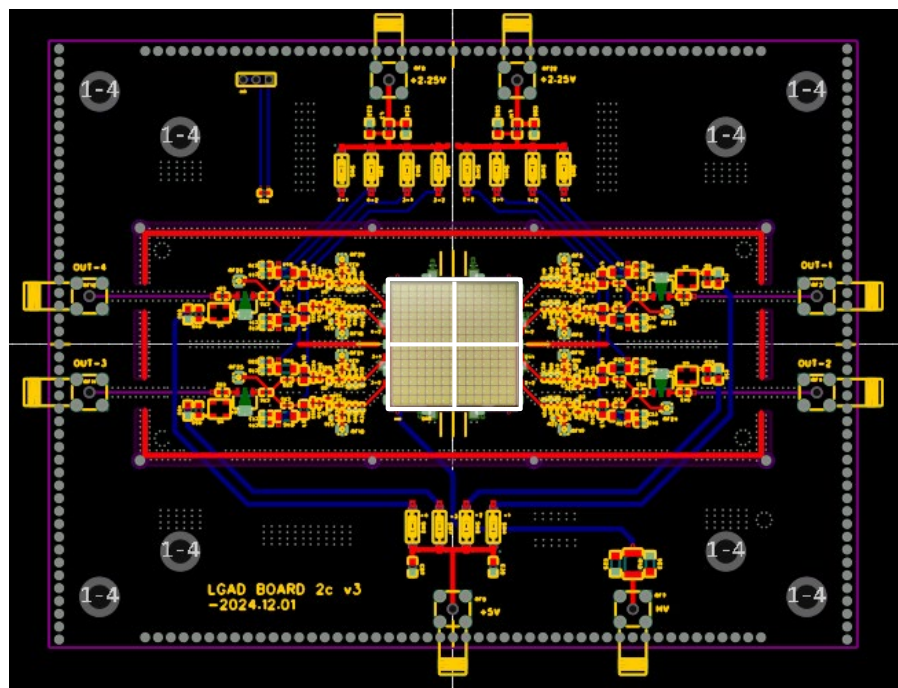
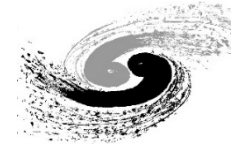
基于LGAD的能量探测器设计参数

- 飞行距离: 40 m
- 时间分辨率: ≤ 100 ps
- 探测器尺寸: 2cm $\times$ 2cm
- 信号输出通道: 4 CH

LGAD探测器设计

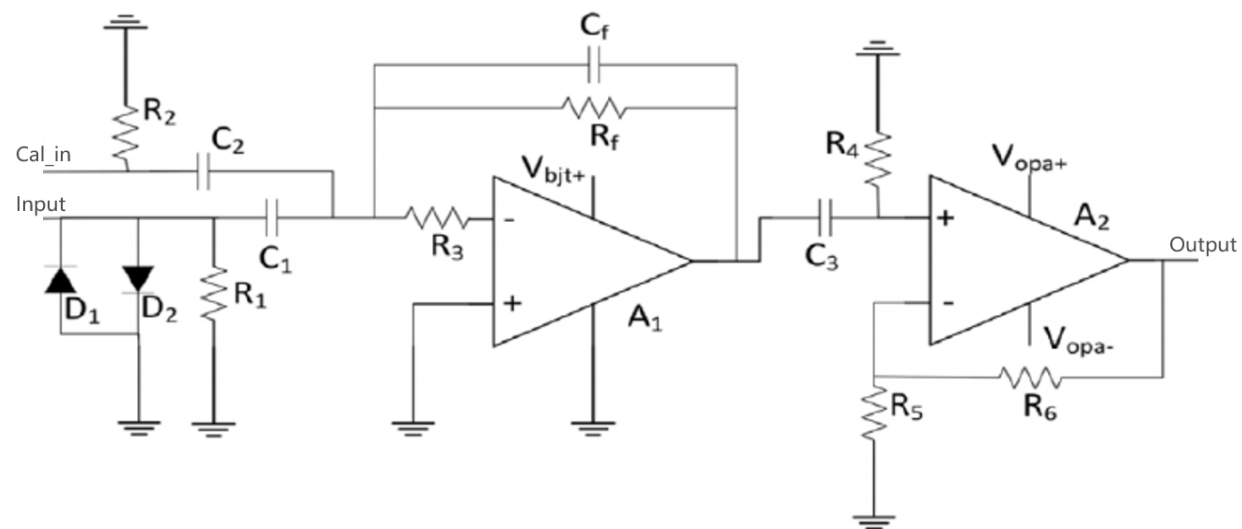
- 尺寸 2cm $\times$ 2cm, 15 x 15像素, 分为 4 个通道读出
- 通过引线键合将 7 x 8 像素 (约 1 cm²) 并为一个通道读出 (等效电容约235pF), 键合到PCB读出版
- 采用板载高带宽放大器, 提高信噪比

2.探测器设计方案



四通道读出板：

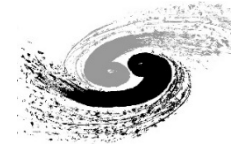
- 器件尺寸2cm x 2cm
- 两级放大设计
- 设计带宽1GHz
- 高频四层板
- 镂空设计降低无质量



两级放大电路：

- 前放：跨阻放大器设计
- 主放：宽带放大器
- 设计总增益~90倍

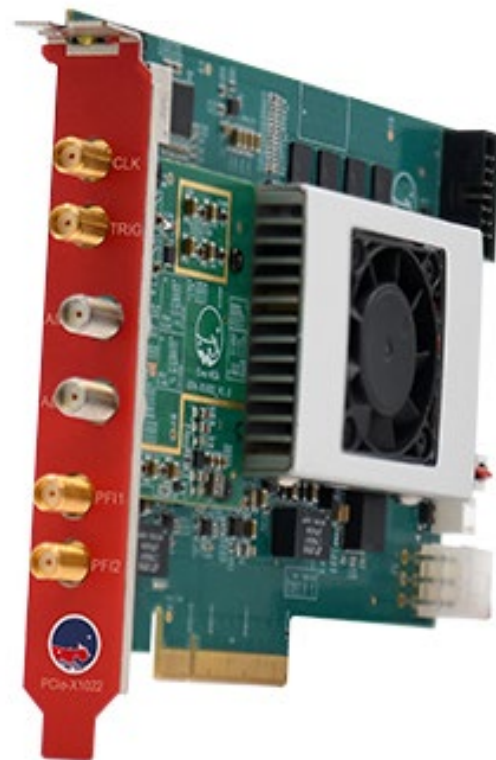
3.电子学与数据获取方案



高速波形采集卡

特征指标：

- 1、采样率：3.2GSPS/6.4GSPS；
- 2、分辨率：12bit；
- 3、通道数：2CH/1CH；
- 4、缓存：4GB DDR4；
- 5、输入阻抗：50 Ω ；
- 6、带宽：2GHz；
- 7、同步性： $\leq 5\text{ps}$ (RMS)；
- 8、输入量程：800mVpp



中科采象 PCIe-X1022

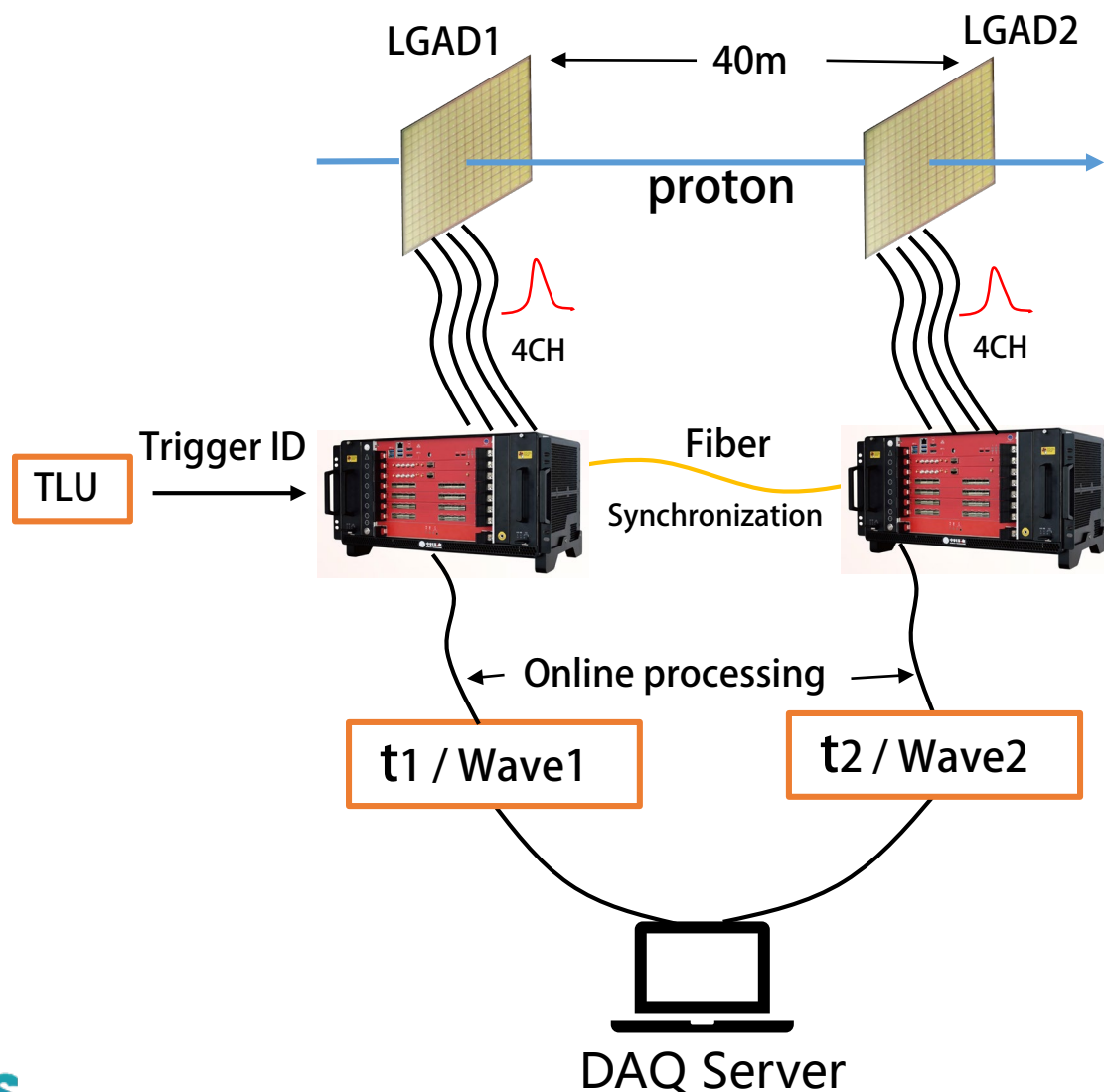
主机：存储 + 预处理

数据定时分析

质子到达时间

3.电子学与数据获取方案

LGAD Energy Measurement System (LEMS)



LGAD探测器模块

- 每个模块4通道
- LGAD1: RABT隧道前段
- LGAD2: 实验终端T2

采集机箱

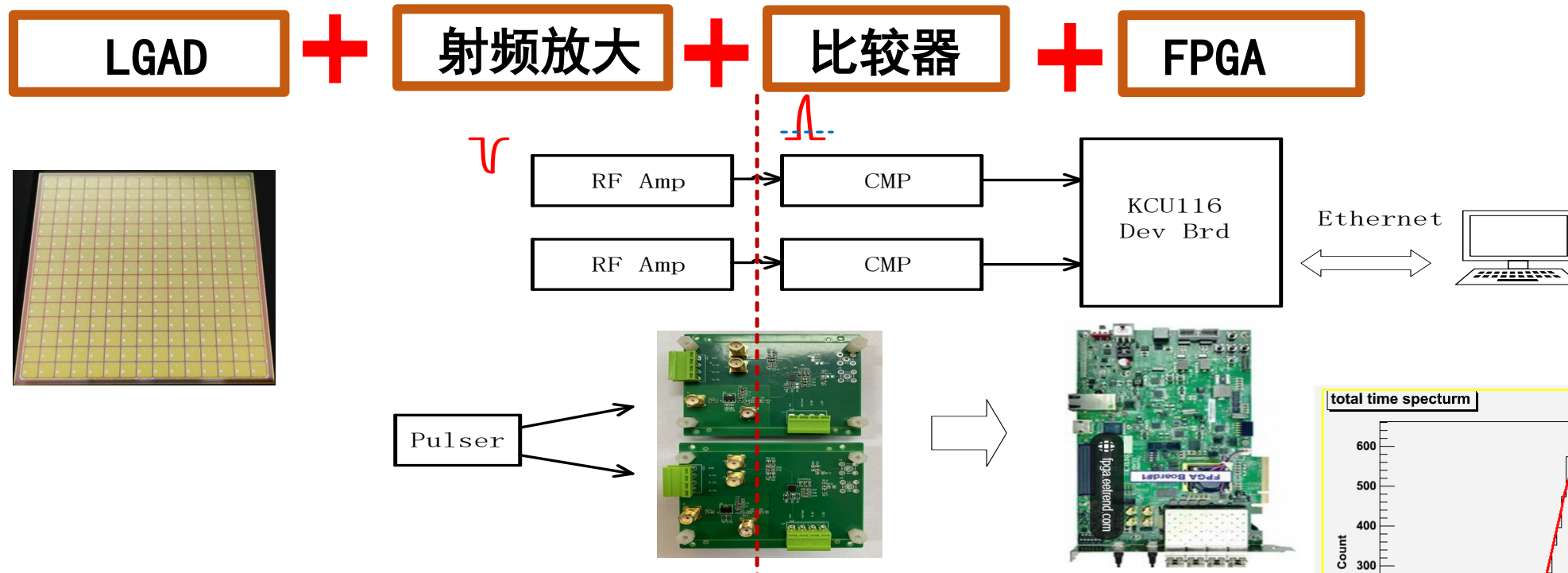
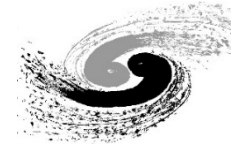
- 机箱1: RABT隧道前段
- 机箱2: 实验终端T2
- 每个机箱4块采集板卡
- 两机箱精准同步(待测试)
- 可实现波形在线处理

波形与时间信息

- 由DAQ服务器读取
- 离线处理: 波形数据量预估~20MB/s
- 在线处理: 可以直接获得时间信息

3.电子学与数据获取方案

备选方案

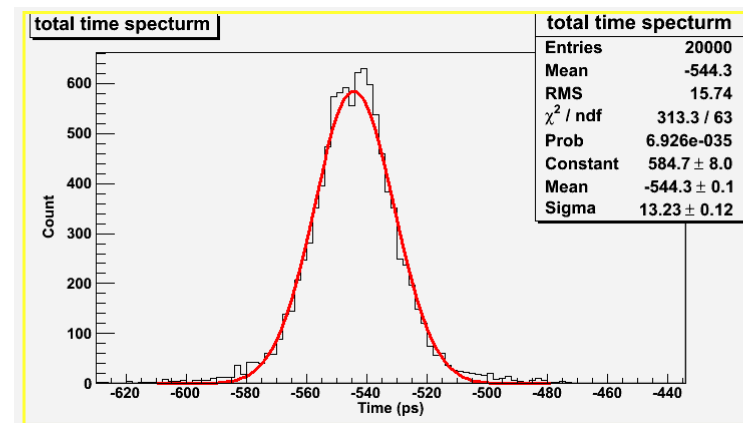


IHEP-LGAD探测器

- 像素 $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$
- 整片 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$
- 4 / 8 / 16 通道

电子学&DAQ

- Kintex Ultra Scale+ 系列FPGA
- 通道数: 16: 4/8/16可调节
- 触发: 自触发和外部触发
- 预期时间测量精度: $<10\text{ps}$

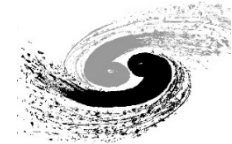


8通道测试板:

- 晃动最小约13ps, 进一步优化

By 胡坤

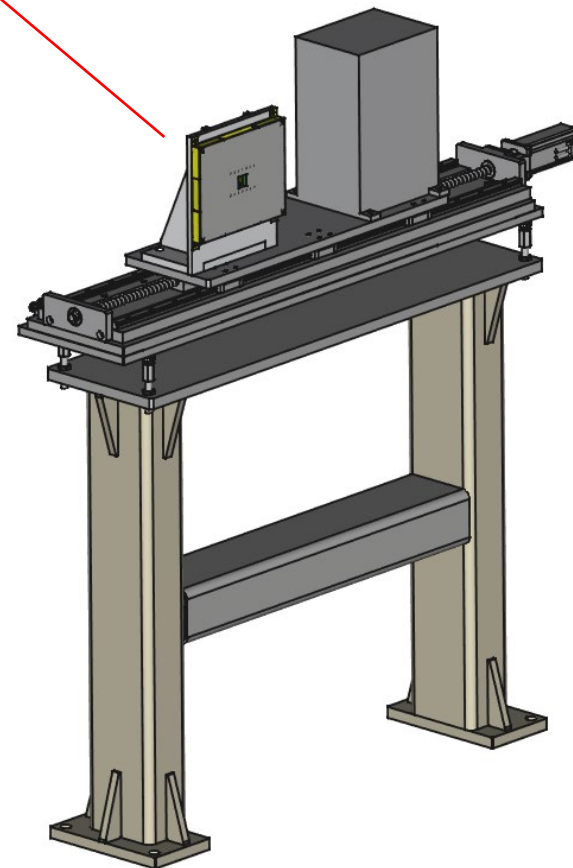
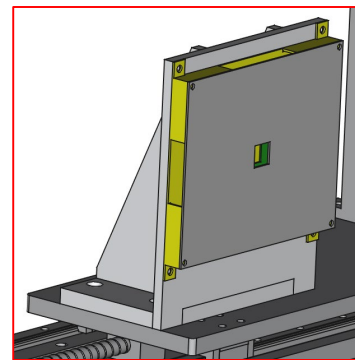
4.机械设计及其控制



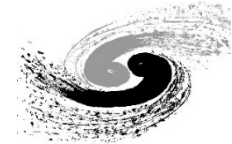
机械设计

两组LGAD探测器模块（LGAD1和LGAD2）均放置于空气中环境中。需设计探测器模块支架，并固定于一维平移台，根据实验需求进行位置调整，功能如下：

1. 探测器模块尺寸 $160\text{mm} \times 120\text{mm}$ ，固定于L形支架。支架固定于一维平移台。
2. 平移台可实现探测器在束流高度，垂直束流方向水平移动，行程大于 200mm ，位移精度小于 1mm 。
3. LGAD1和LGAD2所在平移台可通过计算机实验远程操控其移动。



5.探测器进展情况

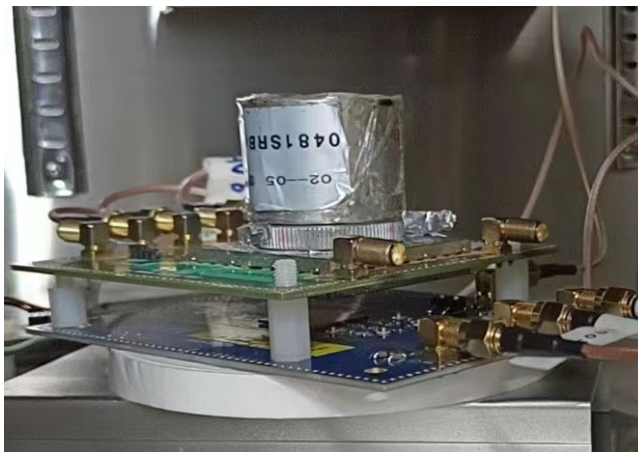


大尺寸LGAD性能测试

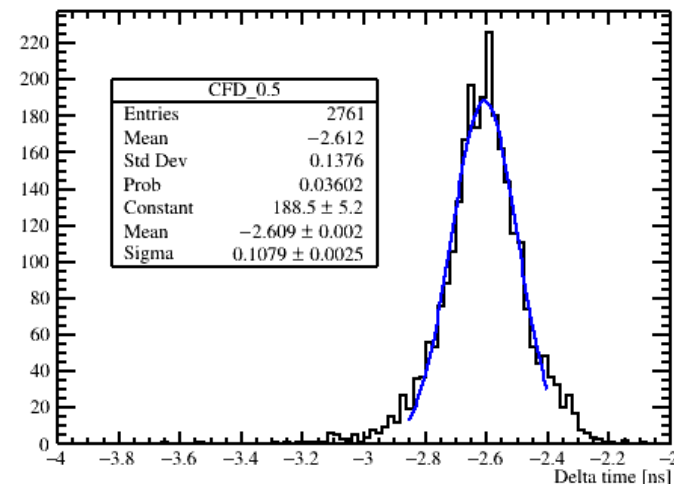
探测器设计重要指标

- 时间分辨率: ≤ 100 ps
- 尺寸: 2cm×2cm

Beta源测试时间分辨

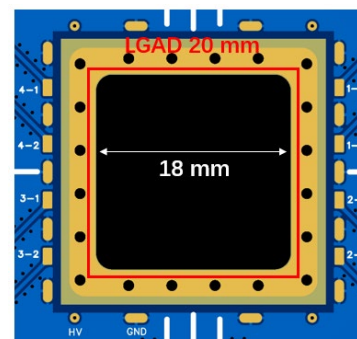
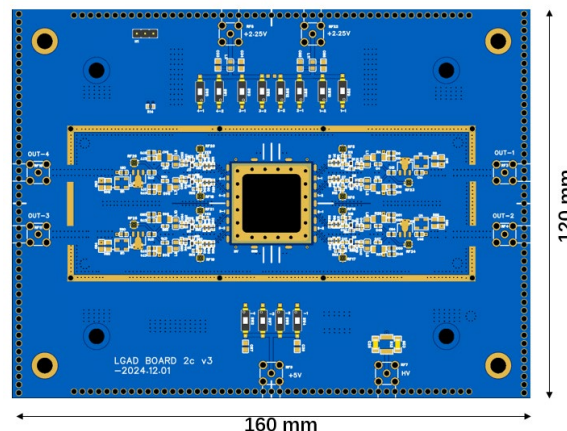


时间分辨率**104ps** @1cmX1cm (单通道)



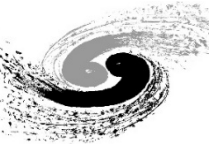
第三版全尺寸读出板设计与制作

- 前放与主放均集成在读出板
- 单通道电压增益约80倍
- 优化了输入RC参数
- 每个通道均可独立控制通断



近期工作计划:

- 全尺寸读出板性能测试与优化
- 2cm × 2cm LGAD 打线
- 时间分辨率对比测试
- 与波形采集板卡联调测试
- 放射源测试与束流测试



谢谢