



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



高颗粒度时间探测器 (HGTD) 外设读出电路的研发

葛振武¹, 车轶旻¹, 王传焯¹, 翟明杰², 梁志均¹, 祁鸣¹, 徐达², 张杰², 张雷¹

1. 南京大学物理学院, 2. 中科院高能所

背景

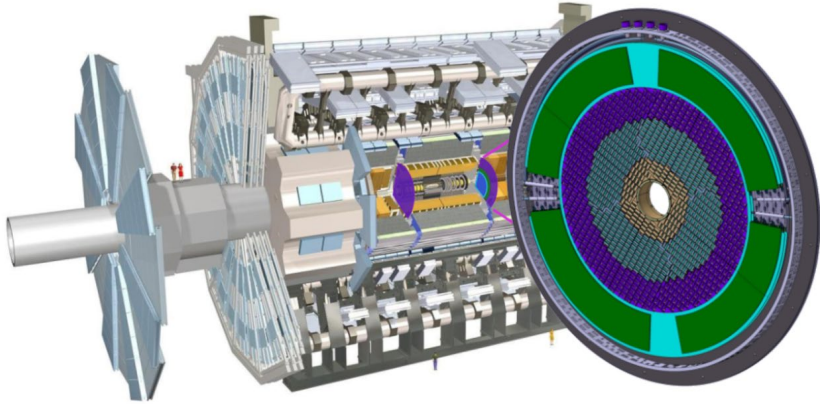
□ LHC计划在2025-2027年进行二期升级，亮度增加十倍以上(HL-LHC)

- 亮度的提升将使p-p对撞空间堆积事例分辨成为主要挑战

□ 高颗粒度时间探测器(HGTD)是LHC二期升级中ATLAS的一个子探测器

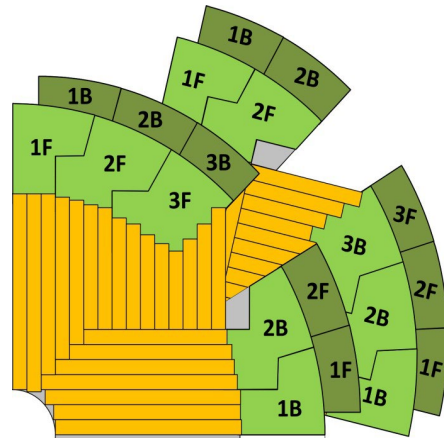
- 位于桶部和端盖量能器之间，精确测量径迹时间信息(<30ps)，测量亮度信息
- 朝前区辐照强(高达 $5.6 \times 10^{15} n/cm^2$)、安装空间小(z向125mm)、传输速率高(单通道达10.24Gbps)

ATLAS探测器

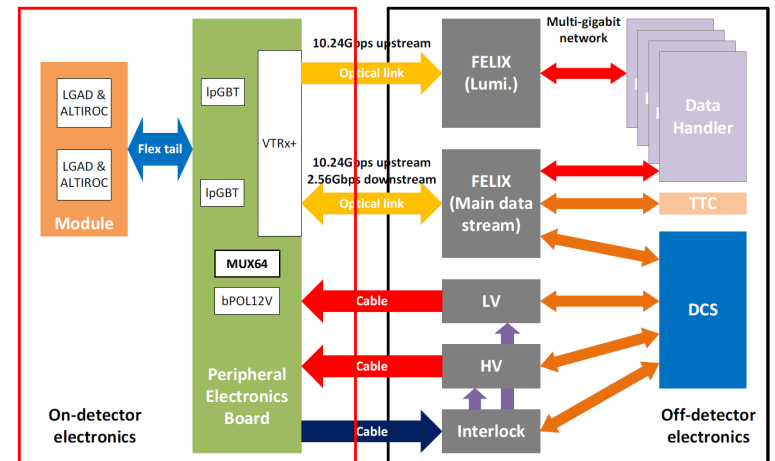


HGTD

PEB及柔性连接PCB



HGTD框图示意



背景：外设电子学读出电路(Peripheral Electronics Board, PEB)

● 功能：

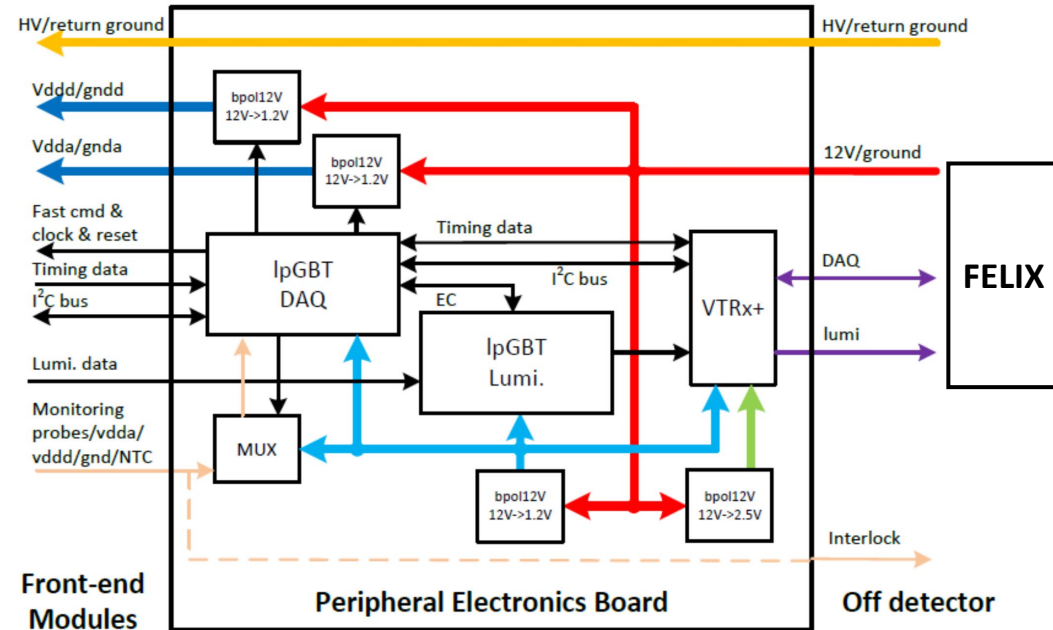
- 编码、组合并传输前端模块测得的时间及亮度信息(10.24Gbps)
- 向前端模块传输触发、时钟、参数配置信号(2.56Gbps)
- 负责高低压直流电源分配管理，为前端模块提供高低压电源
- 监测HGTD探测器运行温度及电压

● 核心器件：

- DC/DC(bPol12V)、收发芯片(lpGBT)、光电转换芯片(VTRX+)、模拟64选1(MUX64)

- 报告主要内容：PEB设计原理验证、关键器件的验证、PEB研制的现状和计划

PEB框图

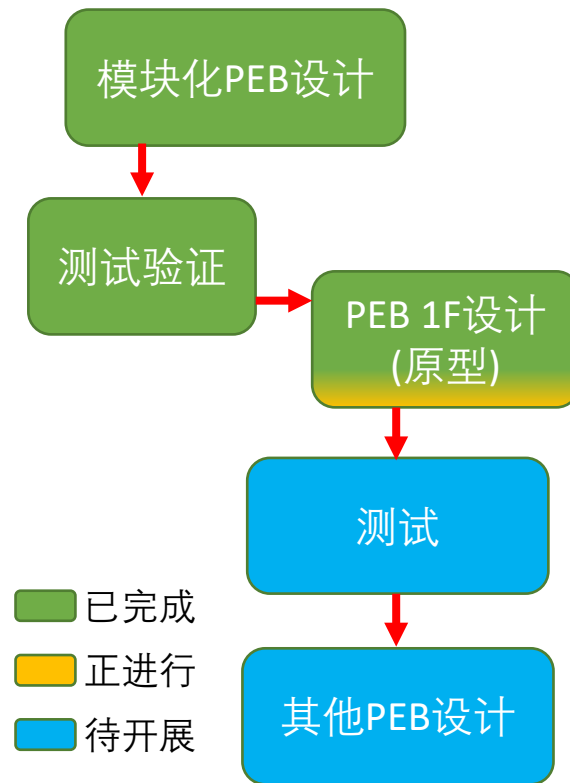
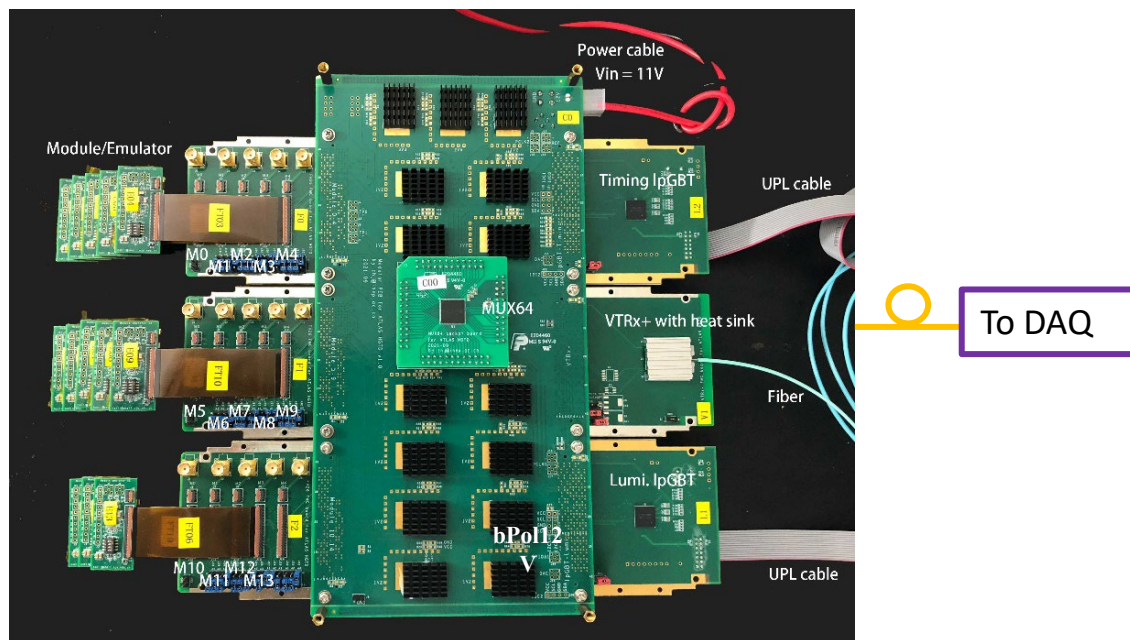


- 由总计6种、160块PCB组成

PEB设计及验证：功能仿真机（模块化PEB）

- 全功能最小系统，关键元器件为单独子板
 - 可分别对其单独测试验证，减少设计风险
- 各子板可连接为全功能系统，开展系统级测试验证
 - 为PEB上下游系统的设计及测试提供必要支撑

模块化PEB

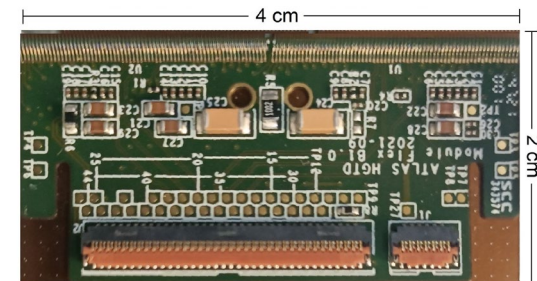


PEB设计流程

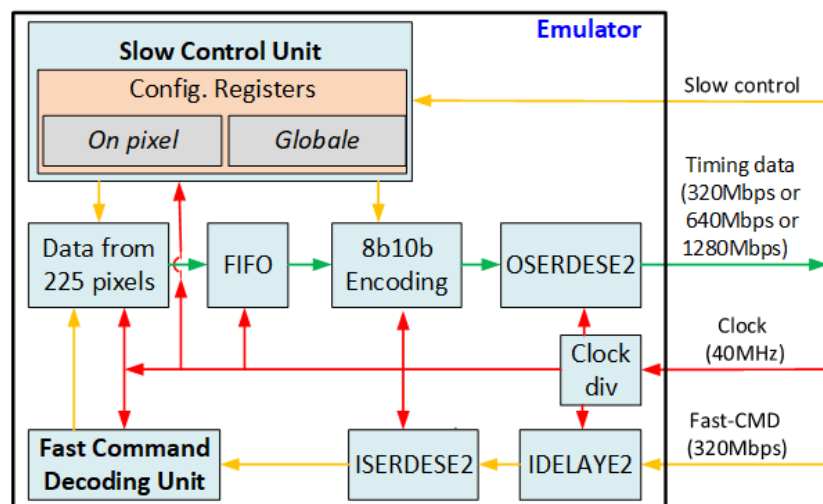
PEB设计及验证：前端模块仿真器开发

- 项目前中期缺少前端模块时，代替模块帮助HGTD设计验证
- 基于Spartan 7 FPGA开发，模拟HGTD前端模块行为
 - 验证前端模块数字逻辑设计
 - 接收、处理trigger信号，通过I²C进行不同功能配置
 - 产生、编码并打包输出时间及亮度信息

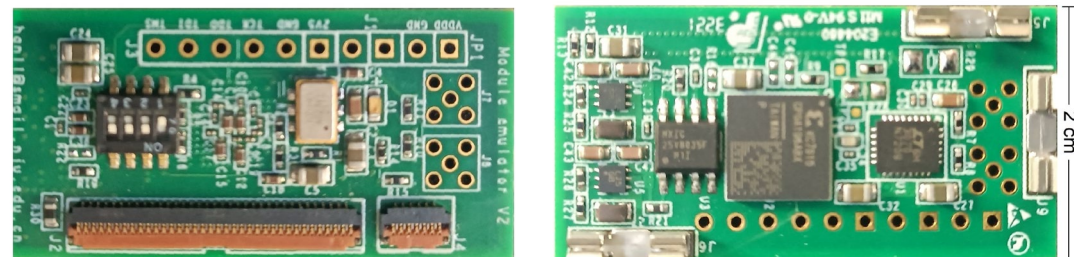
前端模块



前端模块仿真器
固件逻辑

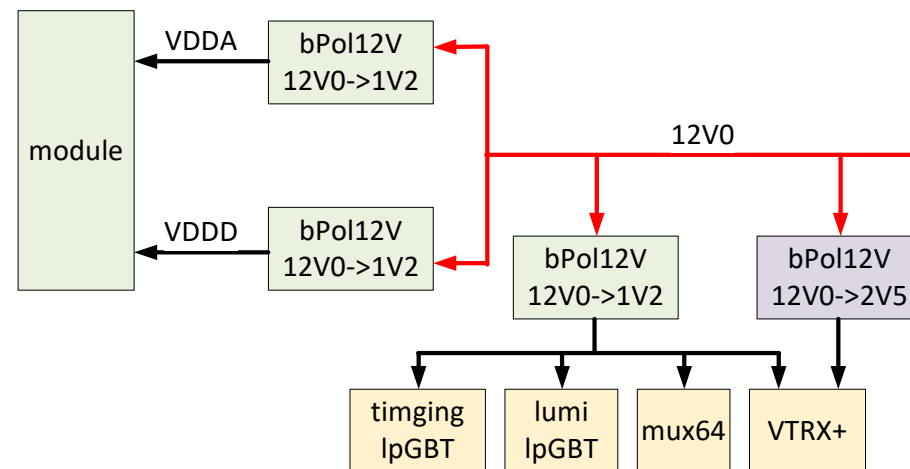


前端模块仿真器



核心器件的验证：bPol12V

- 为前端模块ASIC、IpGBT、mux64、VTRX+供电
- 优化bPol12V模块设计，提升效率、抑制纹波
 - 效率：~76%，随温度降低升高
 - 纹波：小于10 mV
 - 磁场测试：效率及纹波不随磁场强度变化

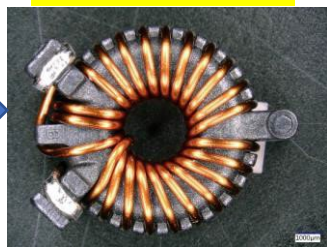


旧设计

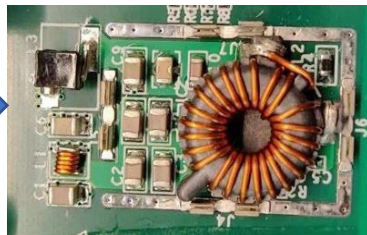


电感改进

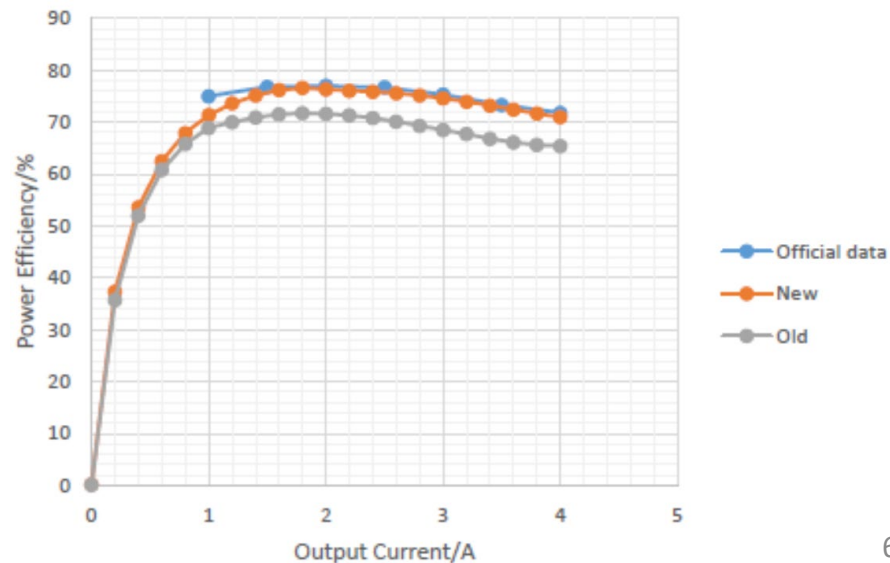
新设计



布局改进

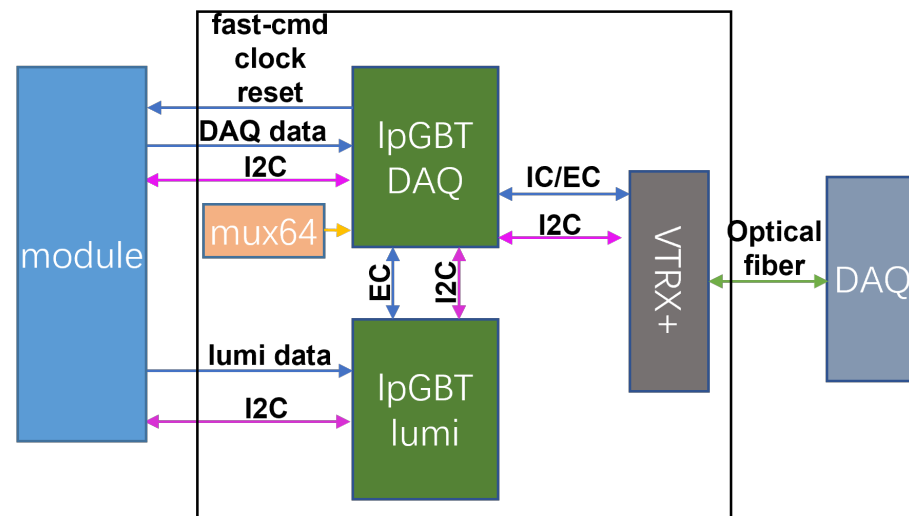


转换效率

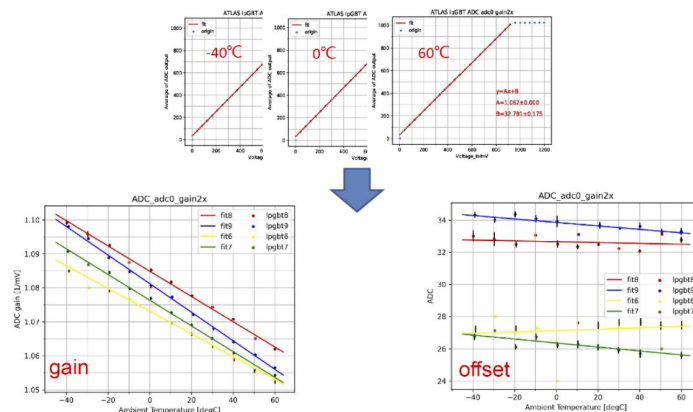


核心器件的验证：IpGBT及VTRX+

- 1个IpGBT 可连接14个前端模块
 - 从前端模块接收测量数据并以10.24Gbps发送至VTRX
 - 向前端模块发送快/慢控制信号，提供时钟
 - 接收状态监测的模拟信号，并在内部ADC进行转换
- VTRX+将控制信号/测量数据进行光电转换



通信质量测试
下行: $< 10^{12}$
上行: $< 10^{13}$

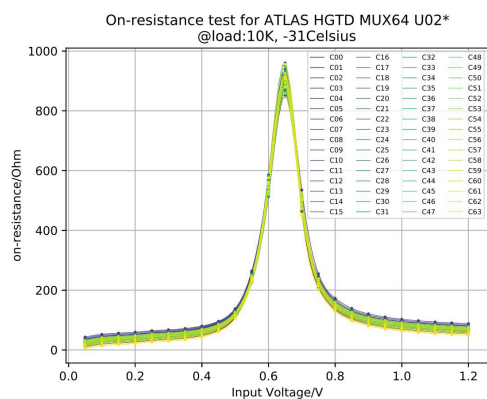


IpGBT ADC 标定

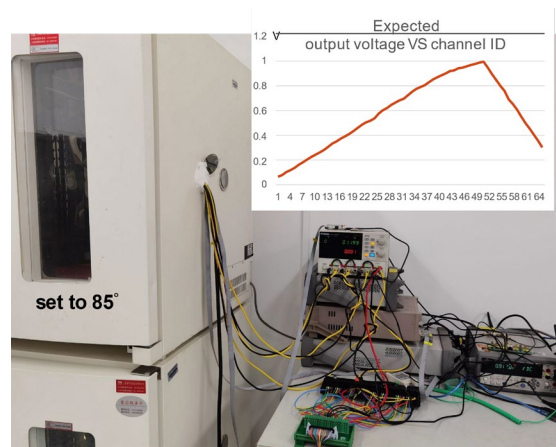
核心器件的验证：MUX64芯片

- 用于选择输出监测探测器的电压及温度信号
- 与美国SMU大学等单位合作自主研发
 - 老化实验：35片芯片85°C高温老化16天，全部通过
 - 高低温循环实验：16片芯片-40—80 °C 100次高低温循环，全部通过
 - 质子辐照实验：累计等效中子计量 $3.21 \times 10^{15} n/cm^2$ ，电阻变化小于25Ω，通过
 - TID辐照实验：0.75MGy，电阻变化小于50Ω，通过

Mux64芯片



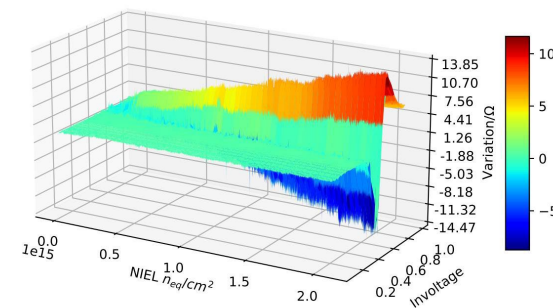
电阻-电压特性曲线



可靠性实验



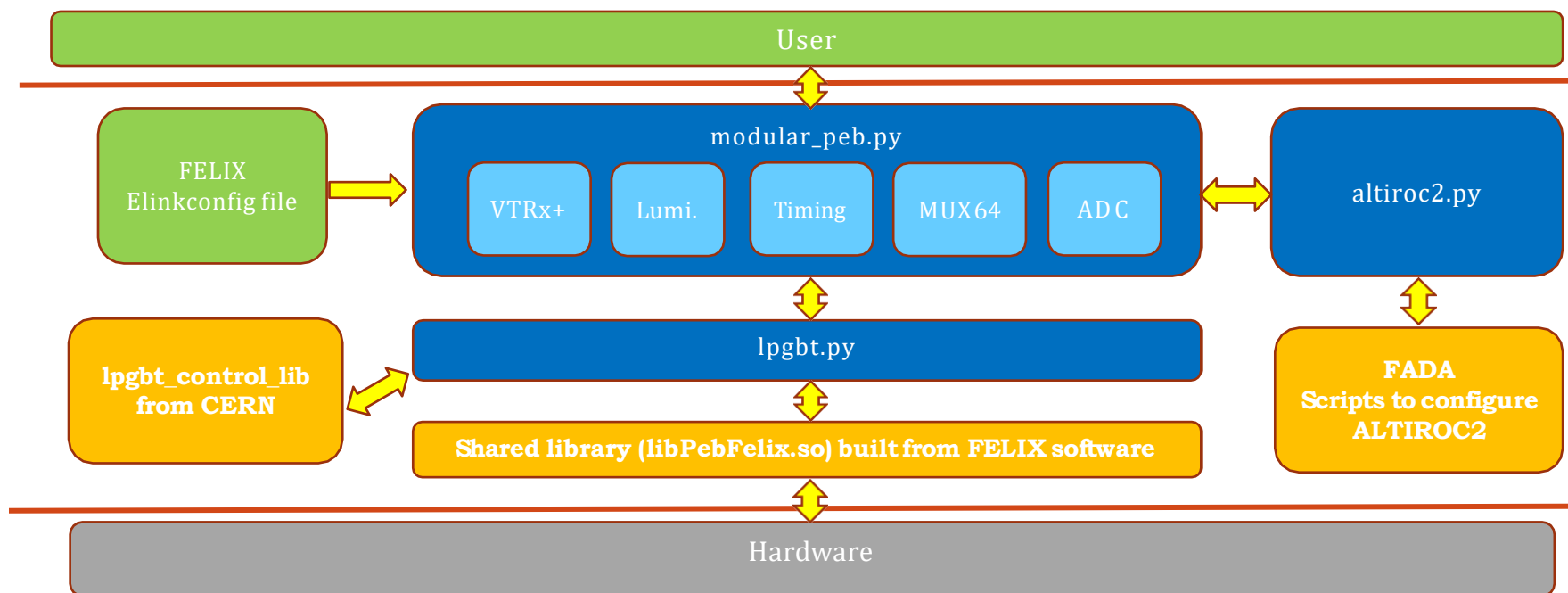
质子辐照实验



质子辐照实验电阻变化率

PEB设计: 系统运行脚本开发

- 前端模块、IpGBT、VTRX+均需正确配置后方可运行，需配置上千个寄存器
 - 运行中需要实时控制系统
- 脚本可实现：硬件初始化、运行参数配置、数据获取、S-曲线及噪声扫描等

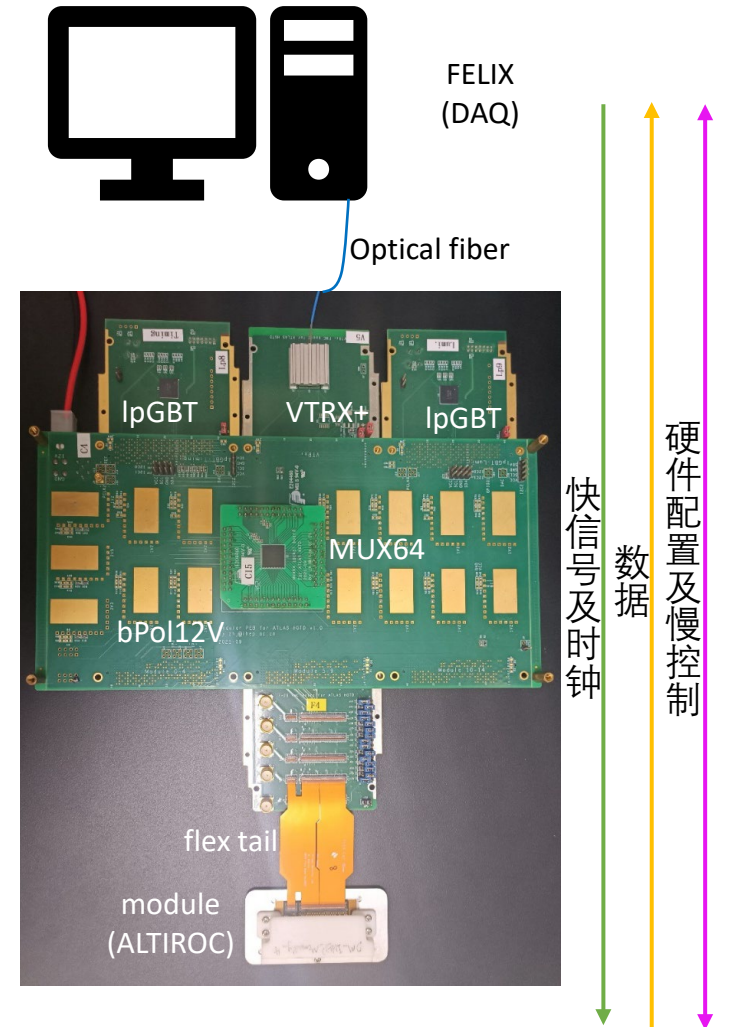
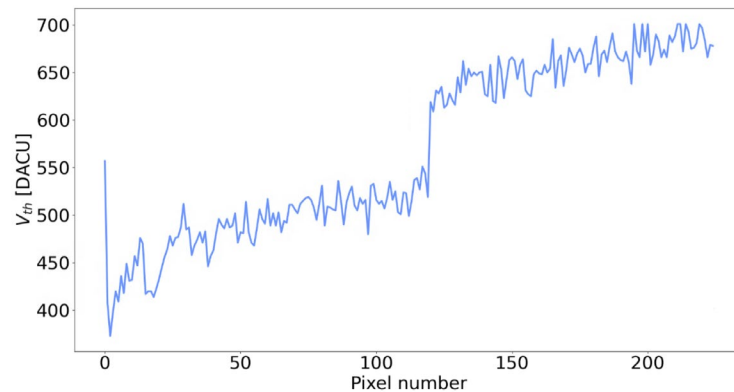
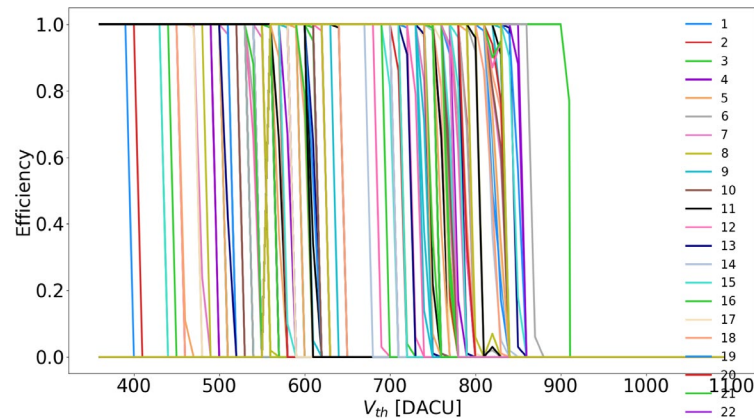


系统运行脚本架构, Gitlab: [atlas-hgtd / hgtd-PEB · GitLab \(cern.ch\)](https://gitlab.cern.ch/atlas-hgtd/hgtd-PEB)

PEB设计及验证：系统级测试验证

- 完成系统配置及数据采集测试，控制信号，监测信号及数据收发功能通过验证
- 开展了前端模块关键参数扫描测试

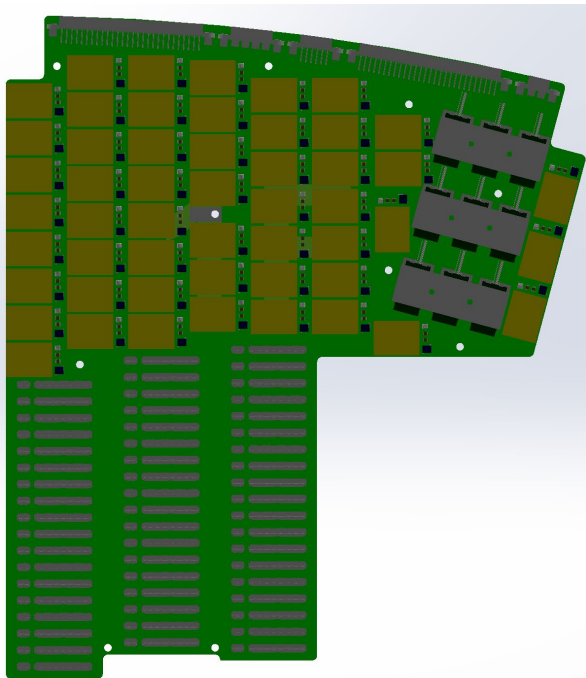
前端模块S-曲线扫描
及噪声扫描



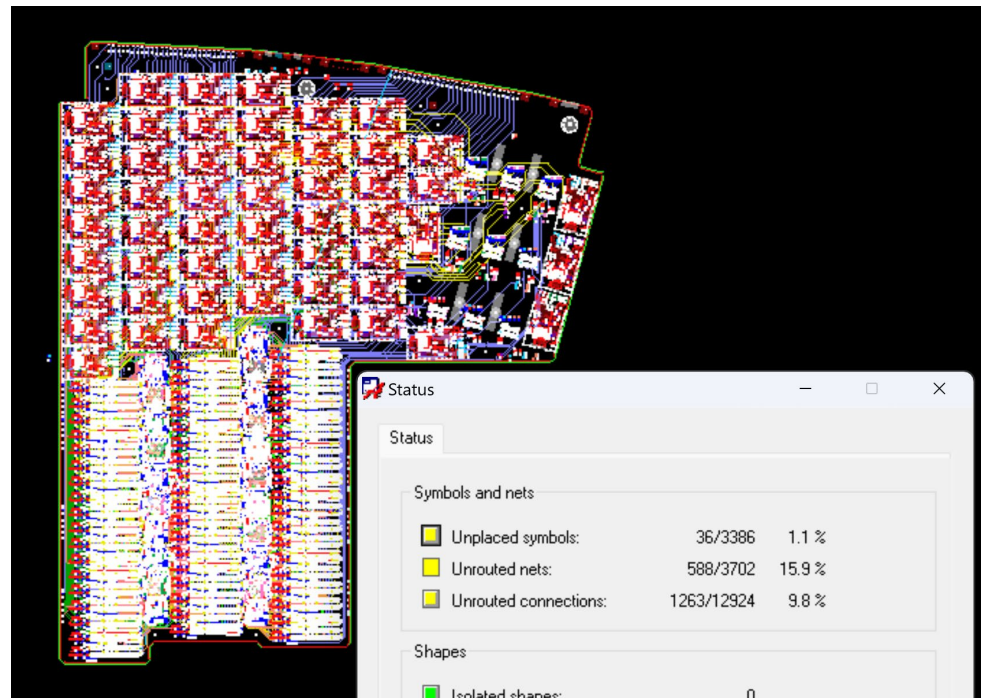
PEB 1F 设计

- 最复杂的PEB板：PCB面积小、厚度薄，元器件及走线密度大
 - 包含9个 timing lpGBT、3个 lumi lpGBT、9个VTRX+，可连接54个前端模块
- 已完成原理图设计及约85% PCB板绘制

PEB 1F 示意图



PCB绘板



总结与展望

- PEB关键器件已完成设计验证，满足设计要求
- PEB 1F 样板设计完成约85%，完成生产后参与探测器演示系统
- 后续将重点开展PEB 1F 板测试及演示系统的测试
 - PEB 1F 板测试：多路控制及配置脚本开发、DAQ测试、可靠性实验、全负载实验等
 - 演示系统：54个前端模块+柔性连接PCB + PEB 1F + 低压系统 + 高压系统
- 预计2024年5月完成所有PEB设计、6月开始提前批生产。

谢谢！