

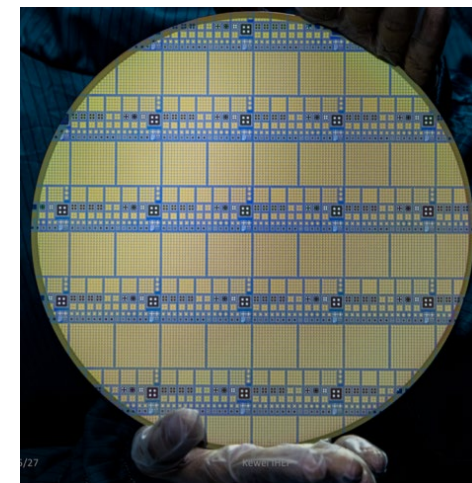
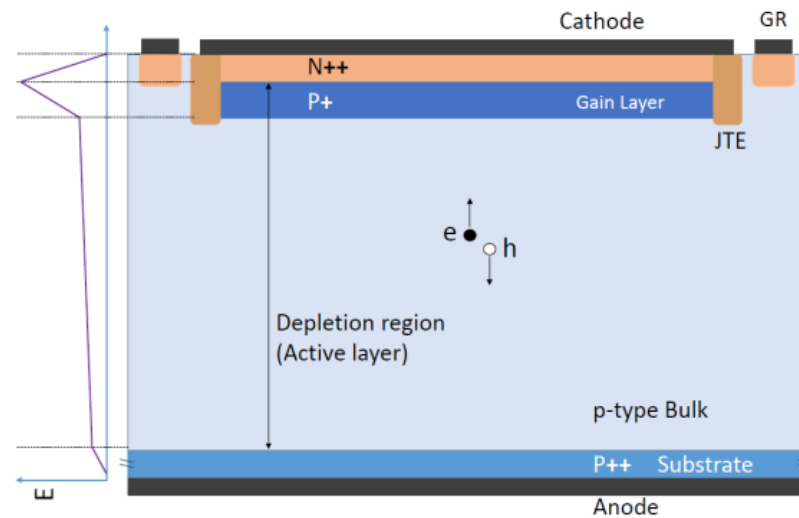
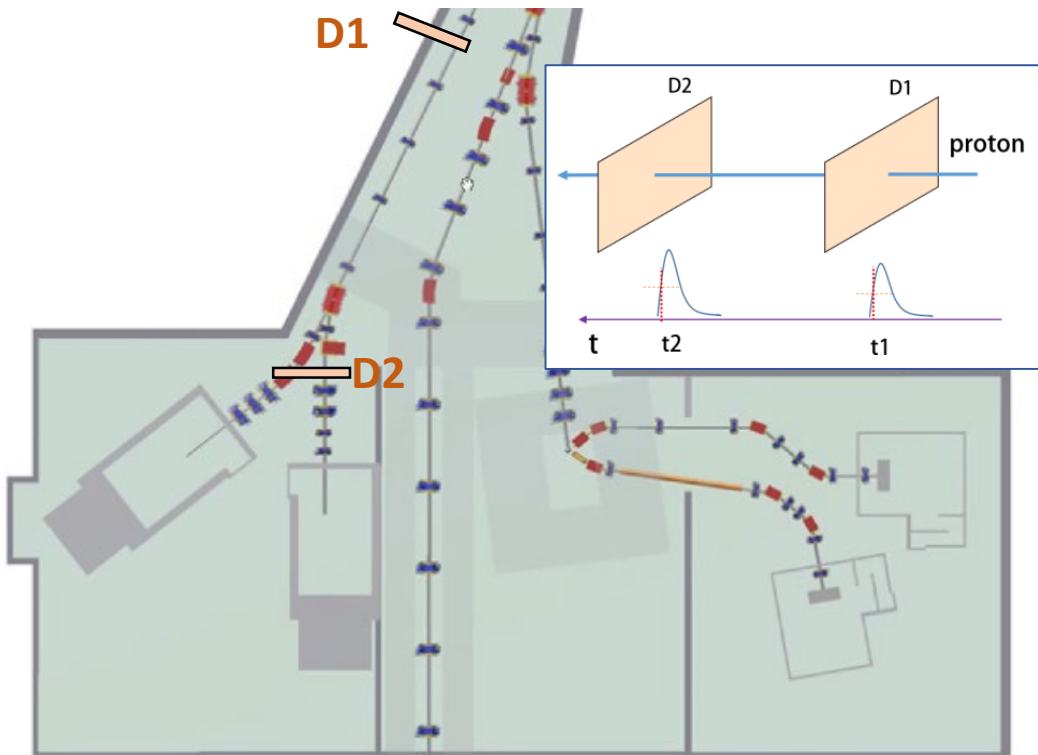
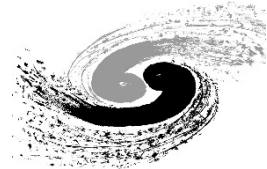
基于LGAD的质子能量测量系统进展

李梦朝 梁志均

2023.10.19

中国散列中子源
中国科学院高能物理研究所

1. 高能质子束能量测量系统



- 探测器D1和D2选用 LGAD探测器
- 飞行时间 $t_2 - t_1$ -> 质子动量
- D1与D2距离40m
- 时间分辨率 $\sim 100\text{ps}$
- 能量分辨率 $\sim 1\%$

- **IHEP LGAD 探测器**
- 时间分辨率 $\sim 30\text{ps}$ @ 1.3mm
- 抗辐照性能 $2.5e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$

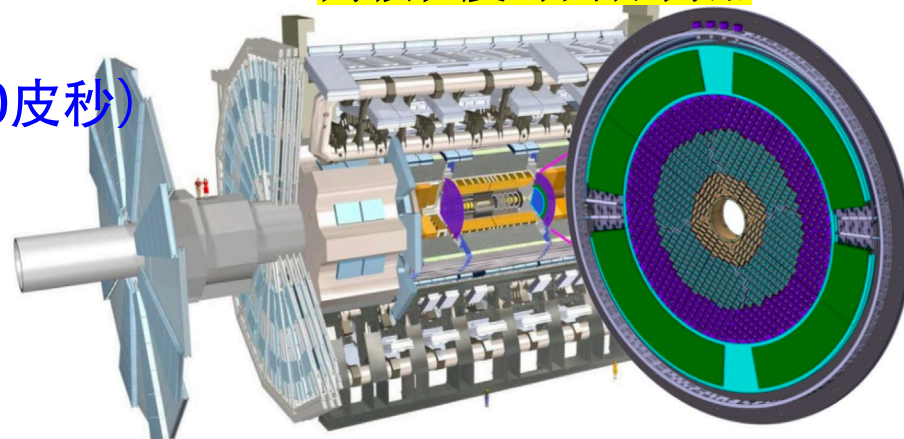
- **IHEP LGAD 8英寸晶元**
- **15×15阵列: 2cm×2cm**

2. IHEP LAGD 研发：ATLAS HGTD项目

High Granularity Timing Detector (HGTD)

高颗粒度时间探测器

- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级（数纳秒→30皮秒）
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题：HGTD 探测器

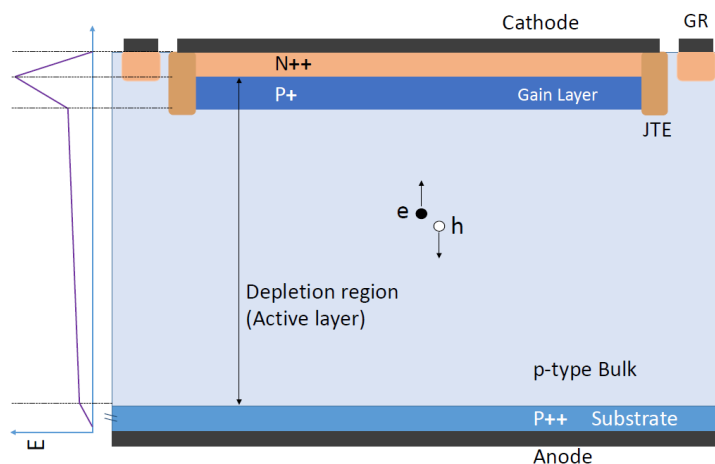


ATLAS探测器

- **LGAD (Low-Gain Avalanche Diode)**
- **6.4平方米**的硅探测器，**30皮秒**的时间分辨
- **毫米级**的颗粒度，**超过三百万个**读出通道
- 能承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量的辐照

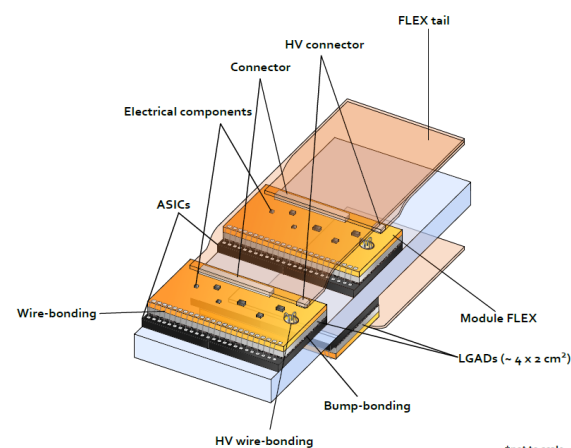
中国组主导探测器研制

- **88%**抗辐照高时间分辨LGAD传感器
(78% 高能所-微电子所, 10%科大-微电子所)
- **45%**探测器模块 (34% 高能所, 11%科大)
- **100%**前端电子学 (高能所, 南大),
50% ASIC测试, **>16%** 高压电子系统



LGAD (Low-Gain Avalanche Diode)

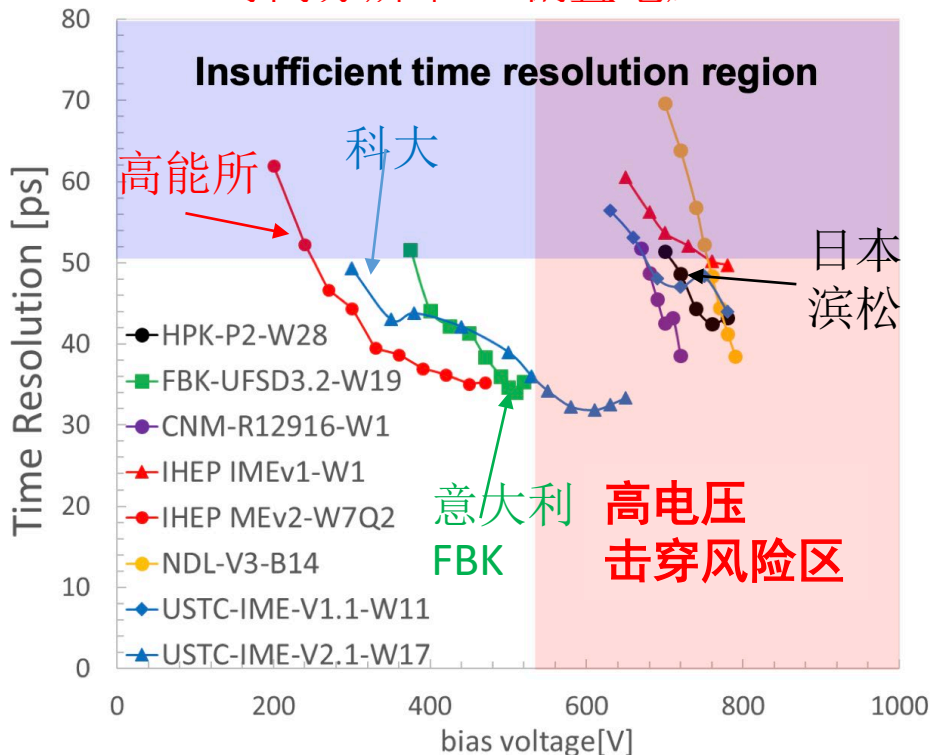
- PN结下注入重掺杂
- 增益10-50倍
- 时间分辨率~30ps



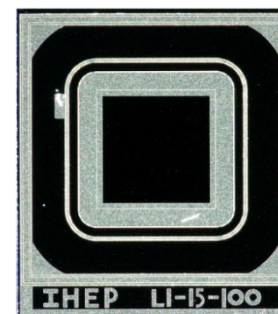
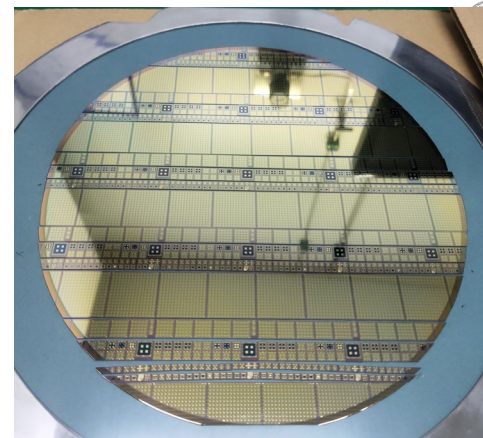
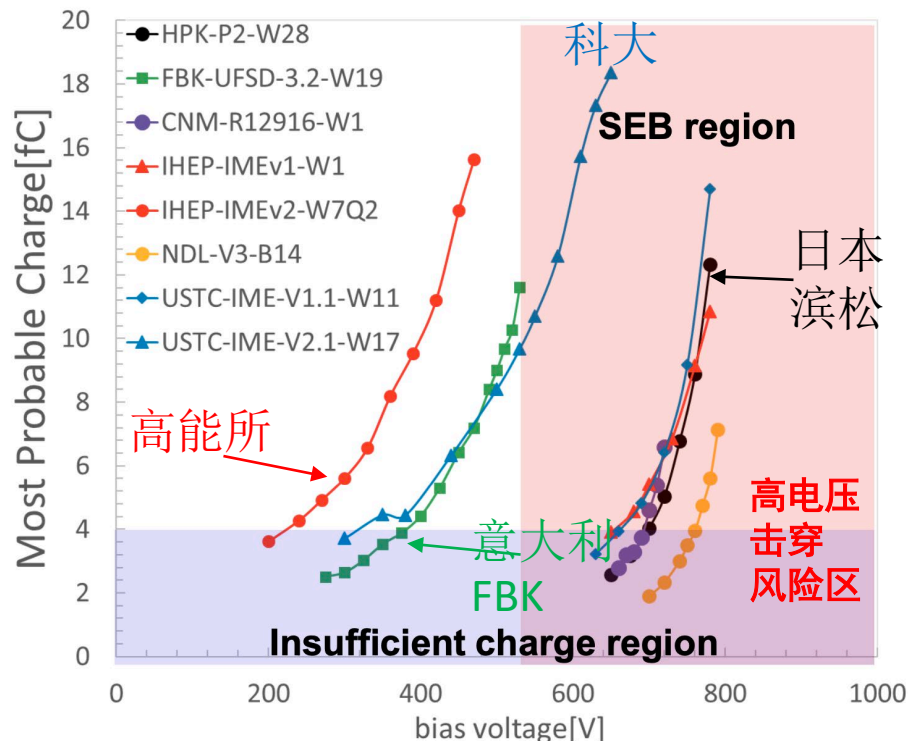
HGTD模块

2. IHEP LAGD 研发：ATLAS HGTD项目

时间分辨率 vs 偏置电压



电荷收集 vs 偏置电压

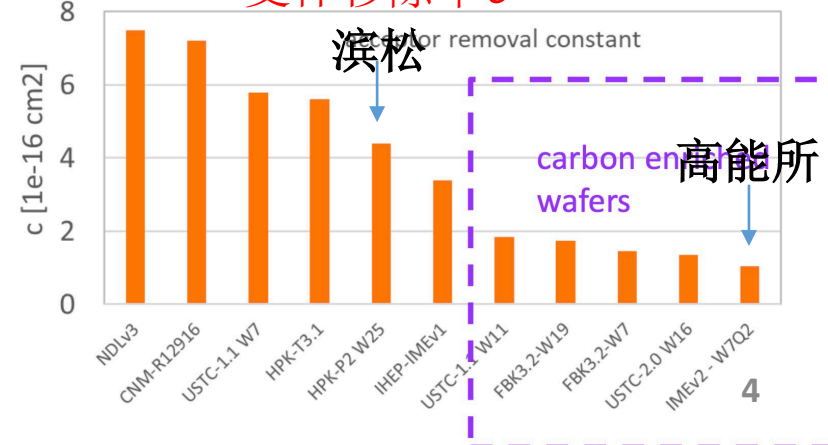


将在 ATLAS 上大规模应用 (IHEP设计的 LGAD贡献78%)

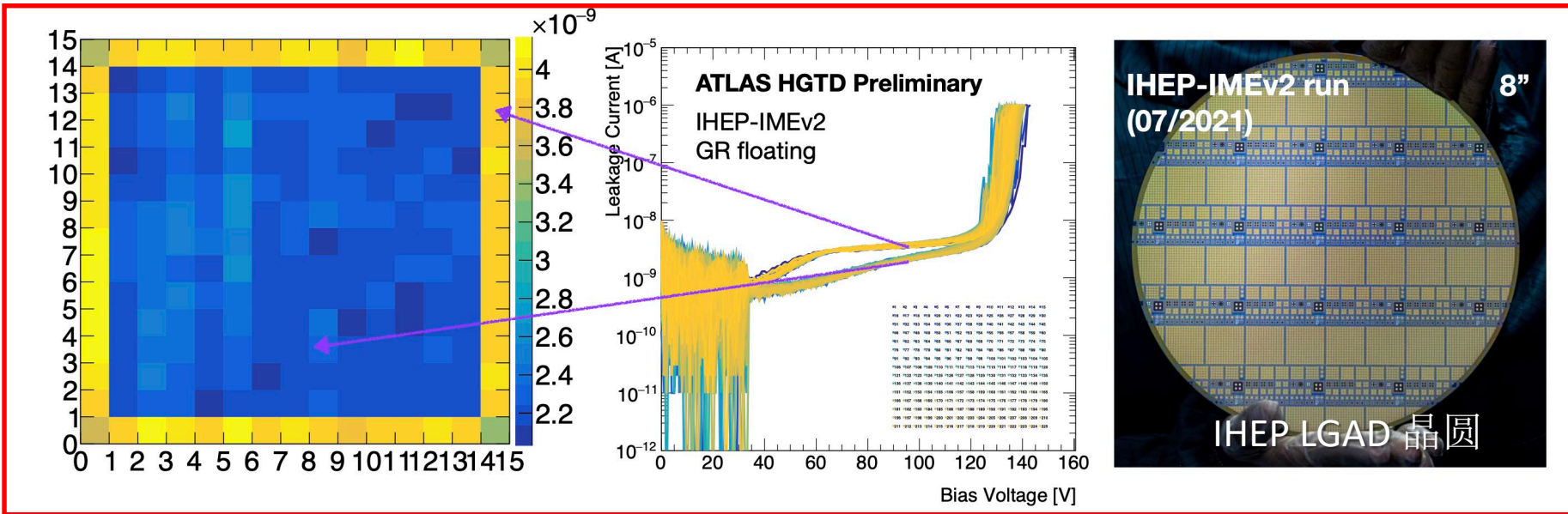
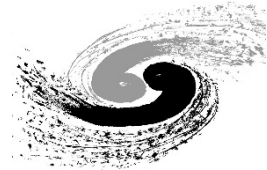
IHEP-IME LGAD

- 受体移除率 C 达到目前世界最小 ($1.1 \times 10^{-16} \text{cm}^2$)
- 时间分辨率最优达到 **34.5ps**, 收集电荷量最高 **12fC**
- 4fC**时的工作电压**350V**, 目前世界最低, 避免单粒子烧毁
- 抗辐照性能超过HPK, 与FBK相当, 某些参数超过FBK,
- 并避免了碳-硼失活问题

受体移除率 C



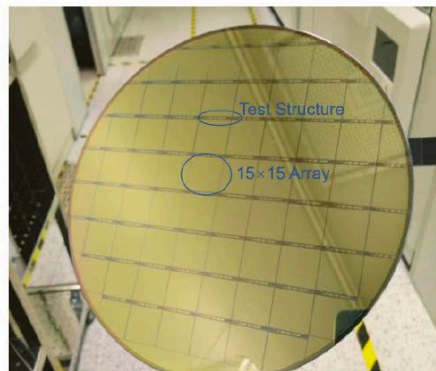
2. IHEP LAGD 研发：ATLAS HGTD项目



高能所已生产出全尺寸传感器
15×15 LGAD

- IHEP LGAD**
- 较好的一致性
 - 良率99.4%
 - 产能够高

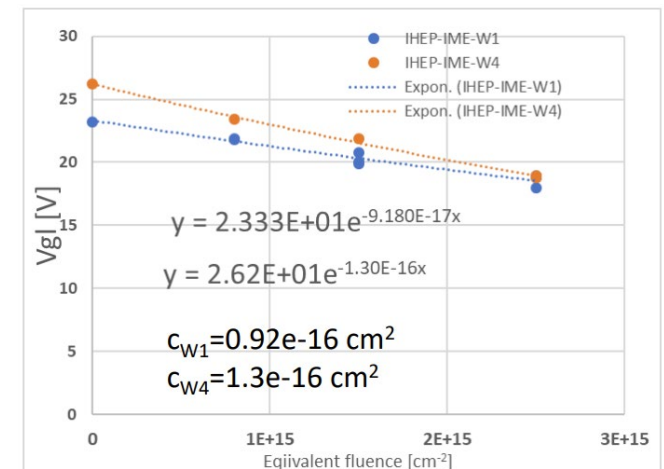
- IHEP为ATLAS 提供78%的全尺寸LGAD，正在进行预生产
- 打破滨松在ATLAS和CMS中硅探测器近乎垄断的地位



预生产晶圆

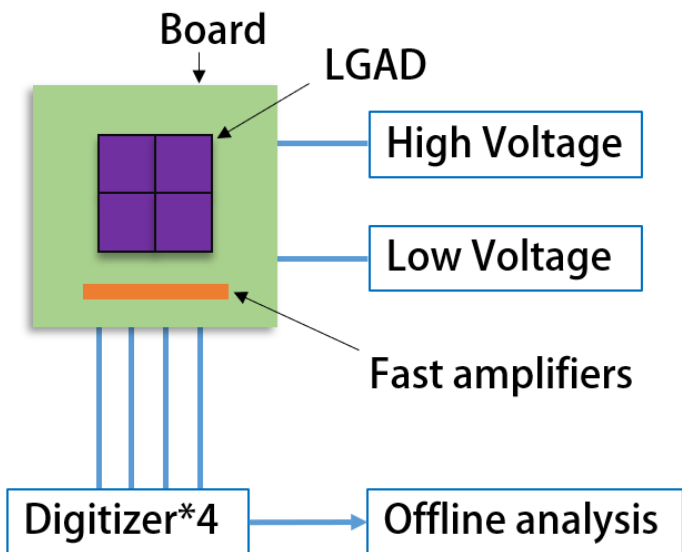
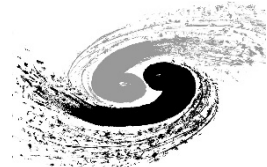
- 15x15 array sensors and test structure
- 52 sensors on one 8inch wafer

预生产LGAD 抗辐照性能优异



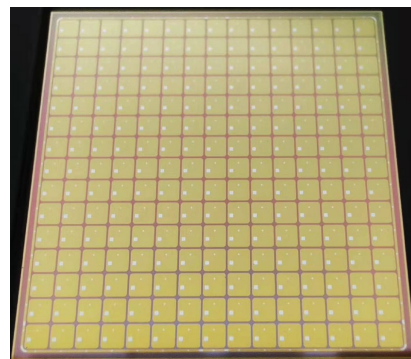
3. LGAD能量测量系统

LGAD Energy Measurement System (LEMS)



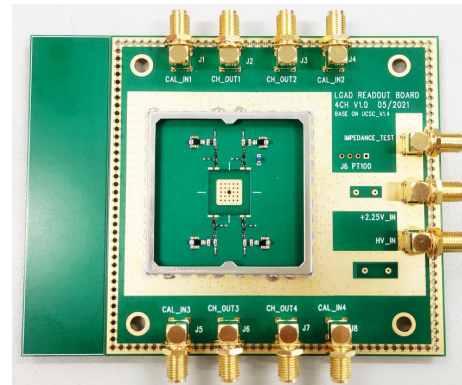
- 时间分辨率 ~100ps
- 能量分辨率 1%

新读出板
板载前放 + 主放



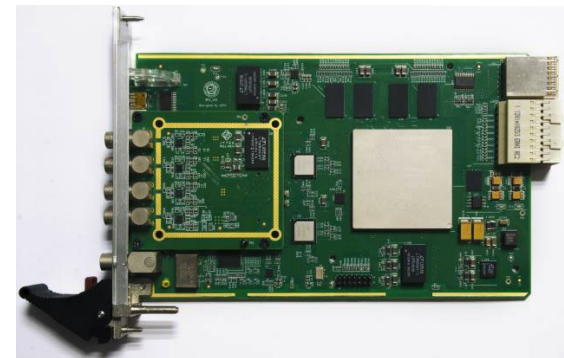
IHEP-LGAD探测器

- 像素 1.3mm × 1.3mm
- 整片 2cm × 2cm



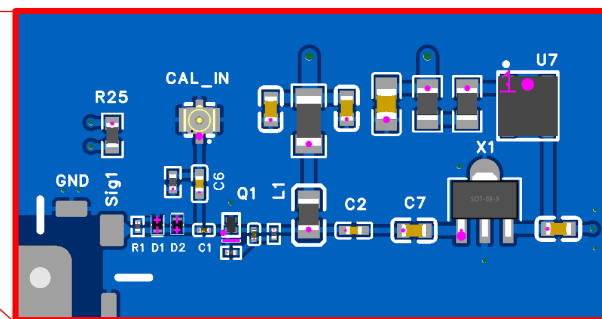
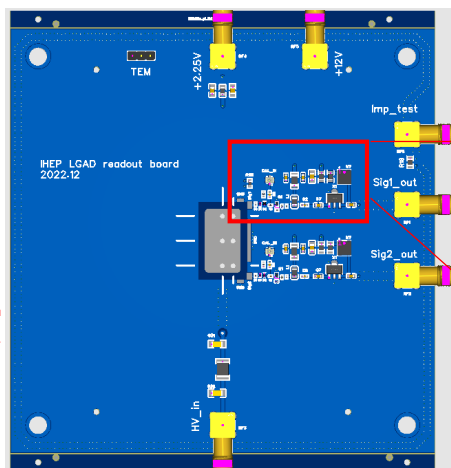
读出板

- 4通道
- 跨阻470欧姆
- 带宽1GHz
- 高压、低压输入
- 刻度输入

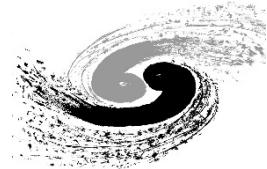


波形采集卡

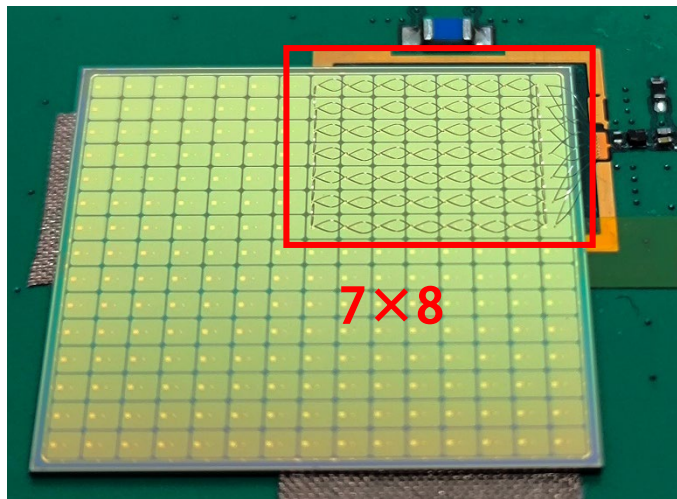
通道数	2
垂直分辨率	12 bit
采样率	最高3.2 GS/s (2通道) 或6.4 GS/s (1通道)
耦合方式	直流耦合
模拟带宽	DC-1 GHz
输入信号范围	800 mVpp
输入接口	单端LEMO
有效位	8.5 bit (带宽500MHz)、8.0 bit (带宽1000MHz)



3. LGAD能量测量系统

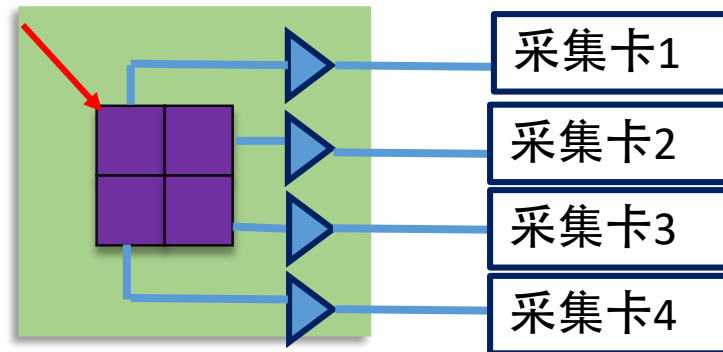


探测器方案一：7x8阵列一路读出

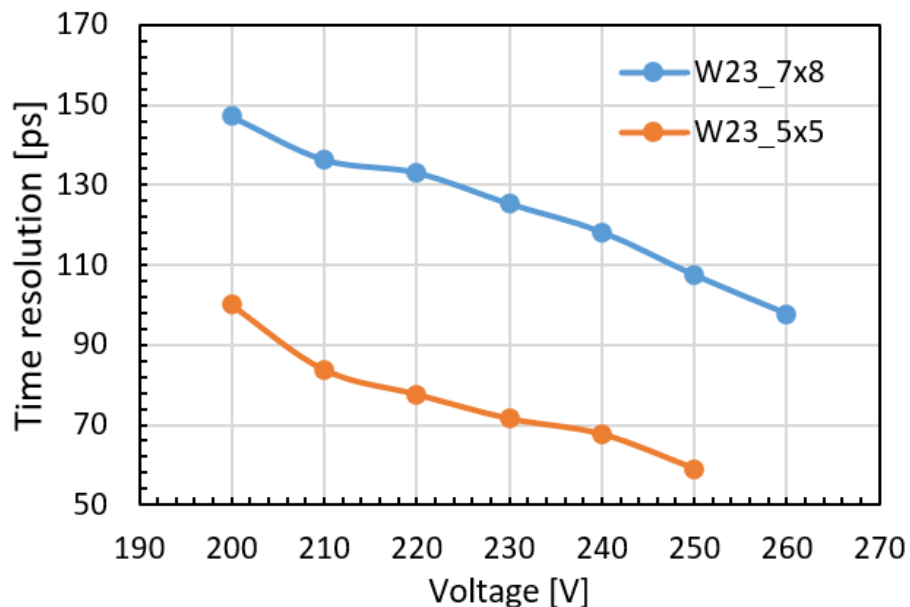


- 15 × 15 LGAD 探测器**
- 整片 2cm × 2cm
 - 15 × 15 像素
 - 分为4通道读出
 - 每个通道 7 × 8 阵列

像素 8x7

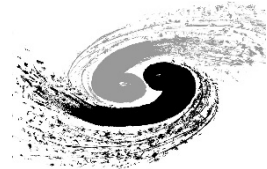


一组探测器成本：
15x15 LGAD *1
放大器 *4
采集卡 *4

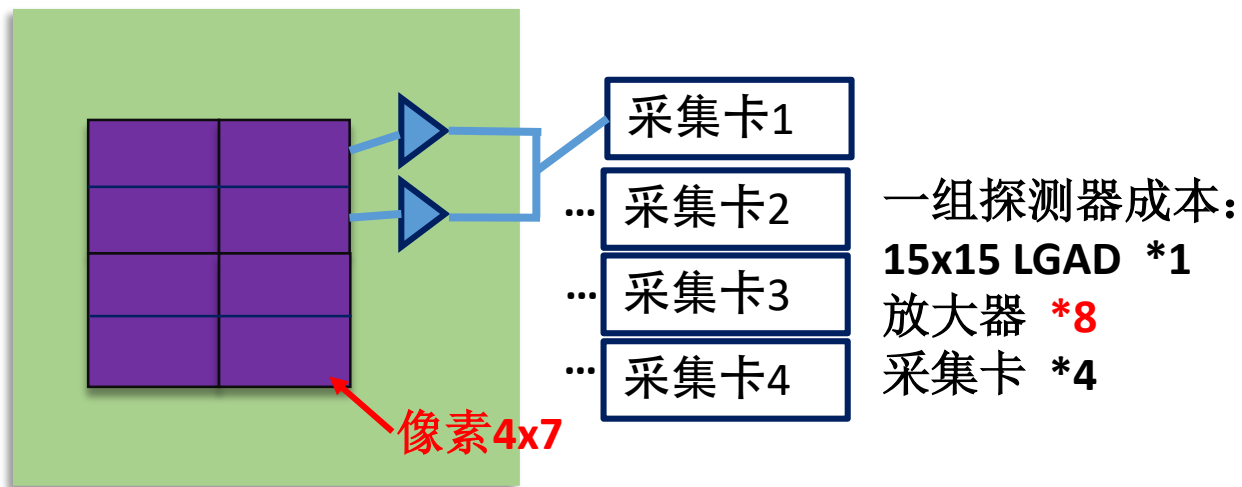


- 目前 IHEP W23的7X8阵列的时间分辨率最优为97ps, 5 × 5为59ps
- 增益、外延层厚度等设计参数将进一步优化

3. LGAD能量测量系统

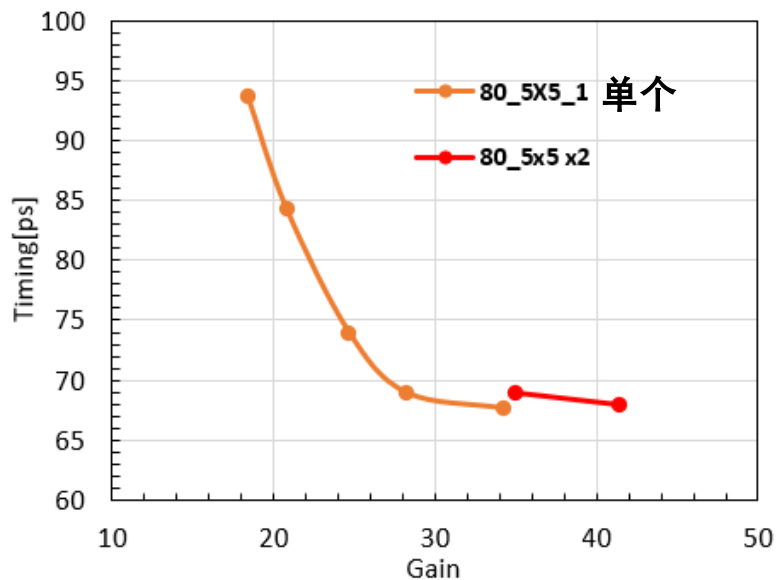
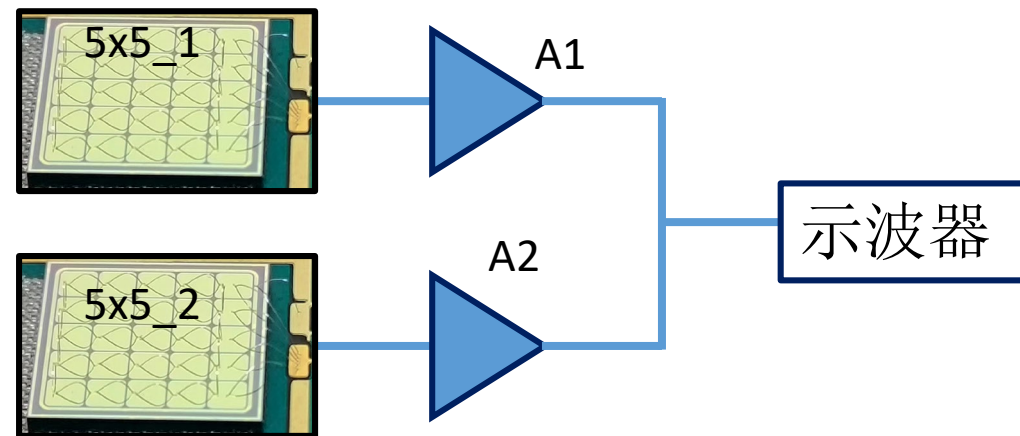


探测器方案二：7x8分为两组放大再合并一路读出



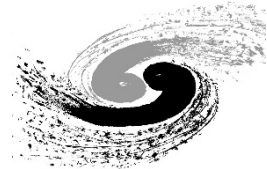
验证试验：

两个5x5 LGAD探测器一路读出



- 目前 IHEP W25 的单个 5x5 阵列的时间分辨率最优为 68ps
- 两个 5x5 阵列信号各自先经放大器再合并为一路读出，时间分辨率没有变差
- 在 15x15 探测器上，验证两组 4x7 合并一路读出的方案
- 更多组的合并读出方案有待下一步实验验证

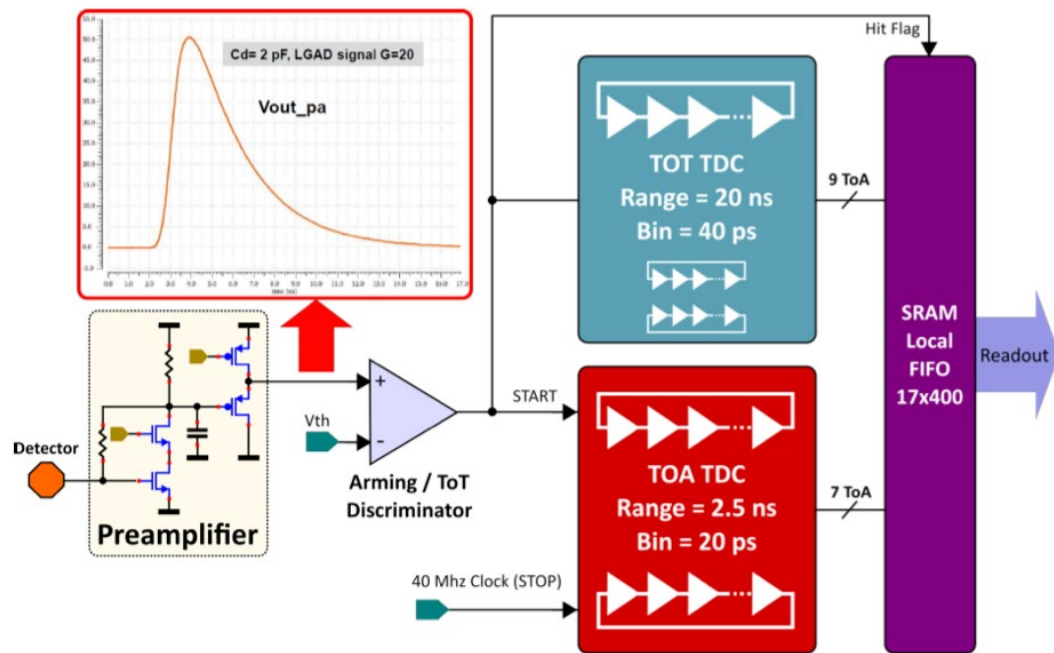
3. LGAD能量测量系统



探测器方案三：LGAD+ASIC读出（长远规划）

ATLAS时间探测器研发超快读出ASIC芯片，多个单位参与225通道，每个通道有一个前端放大器，甄别器，两个TDC:

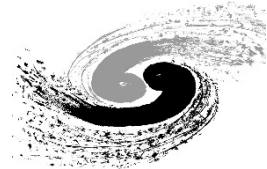
ALTIROC timing ASIC in nutshell



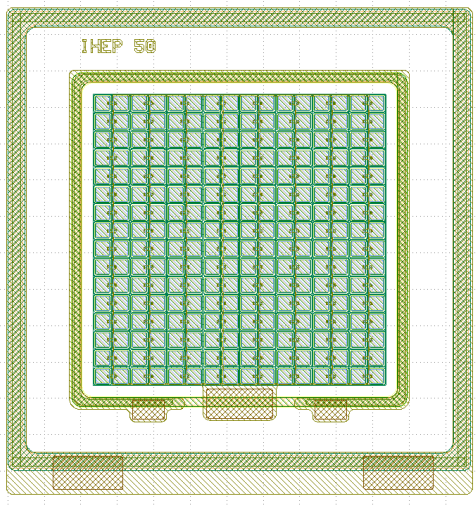
未来国产LGAD ASIC需求:

- 输入电荷量: 4-40fC
- 时间分辨率: 20ps
- 输入电容: 10-100pF
- 输出的参数: TOT、TOA
- 前放: 带宽1GHz
- 死时间: 300ns
- 通道数量: 16×16
- 面积: 1mm*10mm
- 功耗:
- 抗辐照:
- 时间采用占空比: 80/410
- t0输入
- 开窗80ns, 12位TDC

4. IHEP自研 SiPM 样品与性能测试



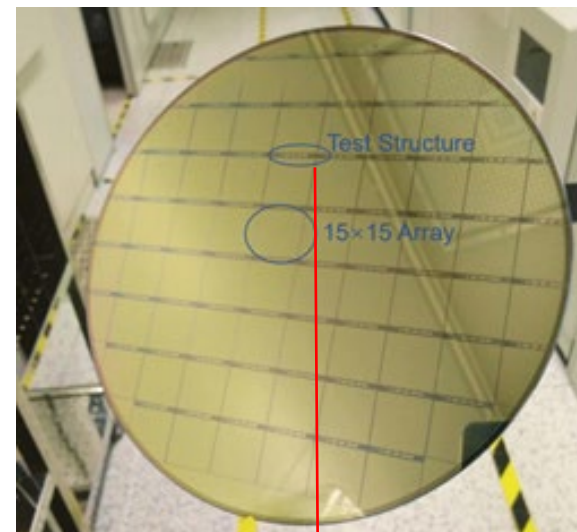
自研SiPM可用于质子束线的触发系统、束流强度测试系统等
还有CEPC、HERD、LACT等项目



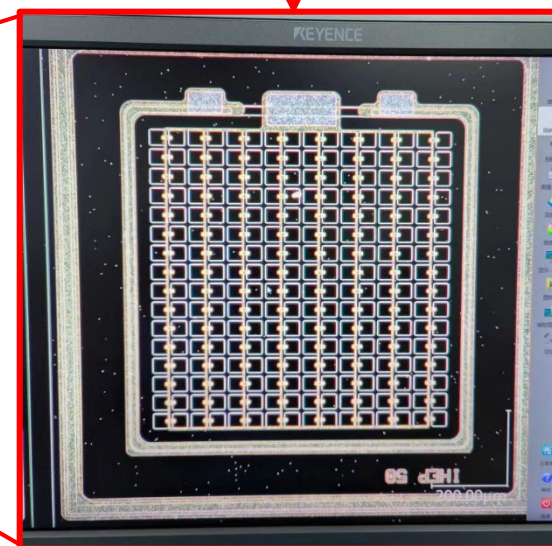
随LGAD 预生产的SiPM样品

- 部分结构与工艺初步验证
- Pixel size: 50 μ m
- 16 x 16 pixels
- 9月初收到, 划片、打线
- 接下来: I-V、C-V、单/多光子性能测试

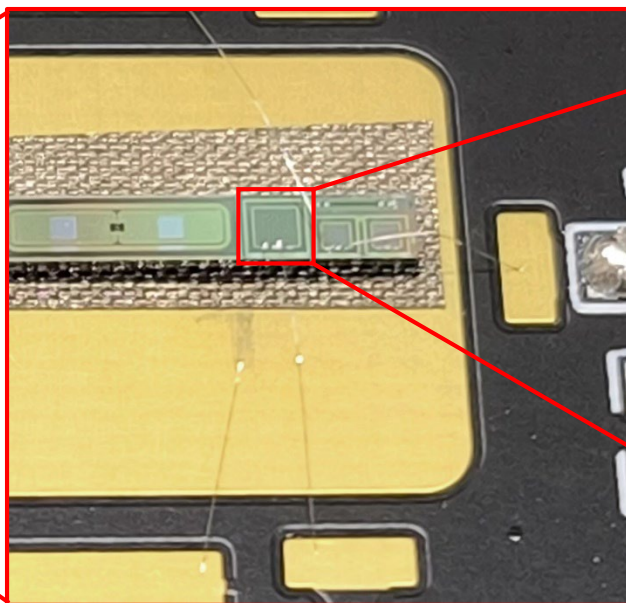
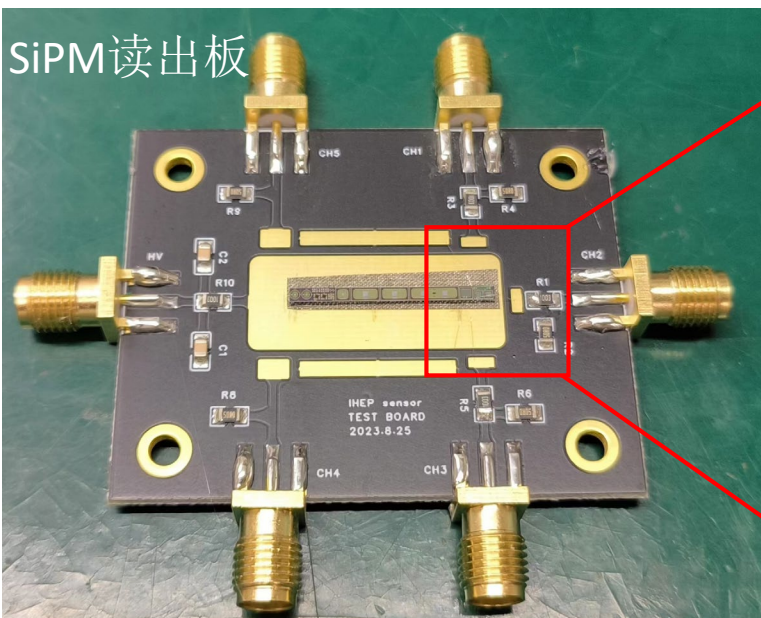
LGAD预生产晶圆



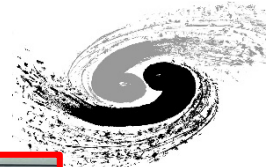
SiPM



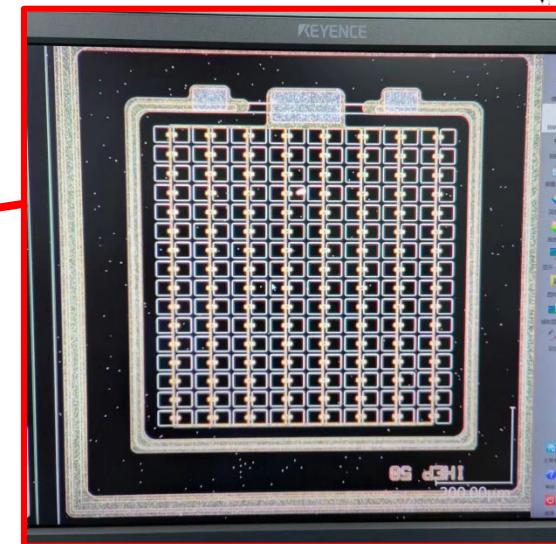
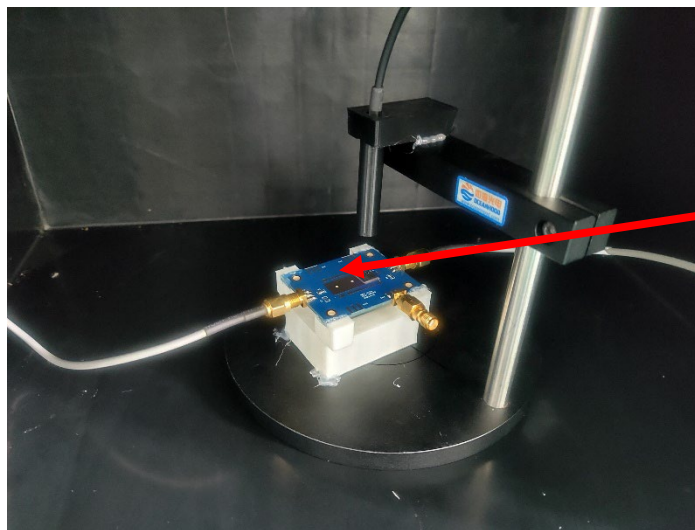
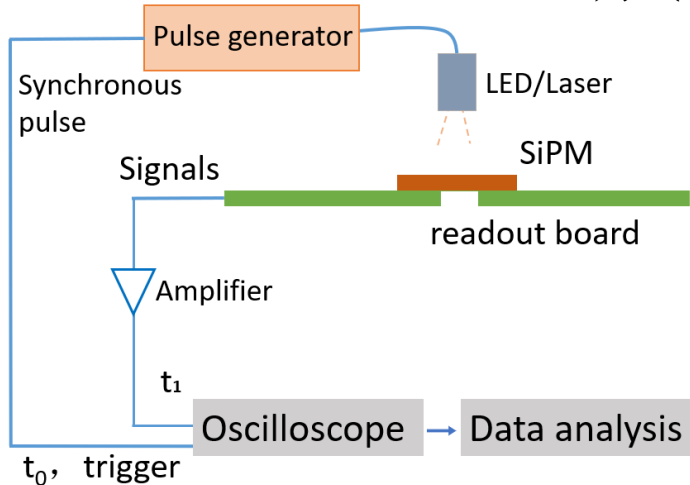
SiPM读出板



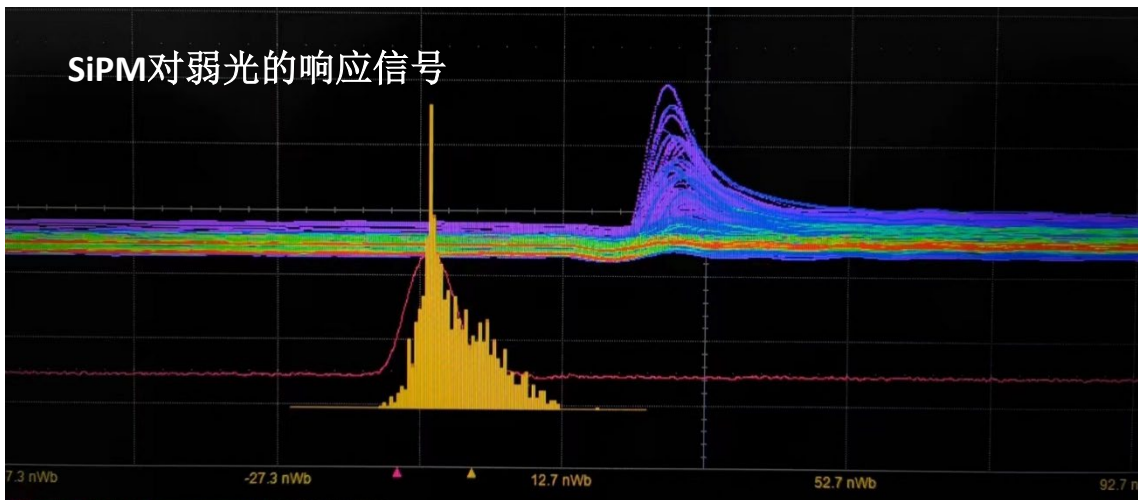
4. IHEP自研 SiPM 样品与性能测试



SiPM测试系统

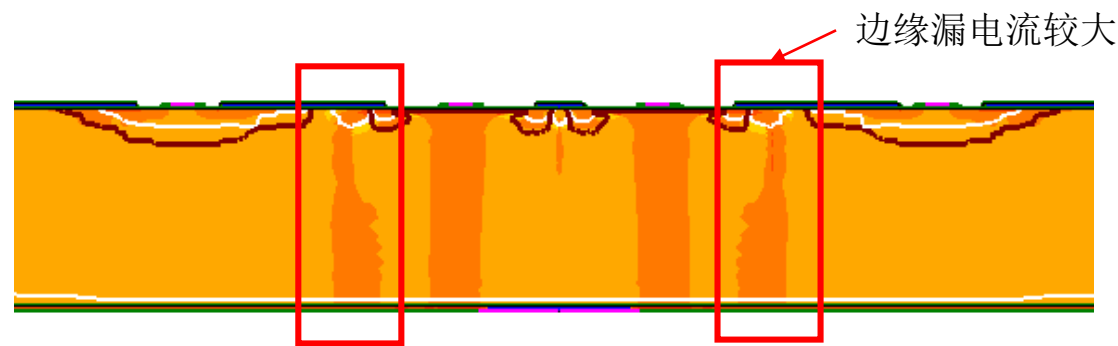


SiPM对弱光的响应信号



在LGAD预生产晶元中

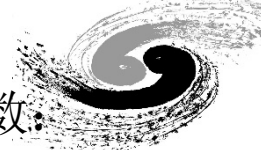
- SiPM的结构设计和部分工艺得到验证
- 能量分辨率有待优化



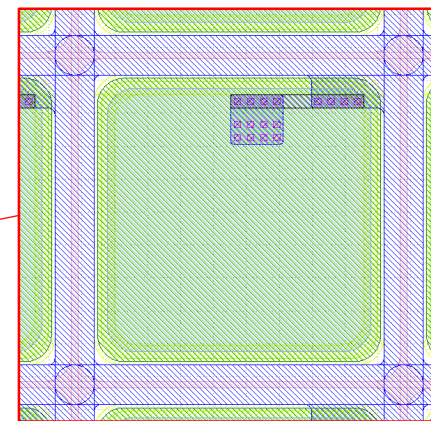
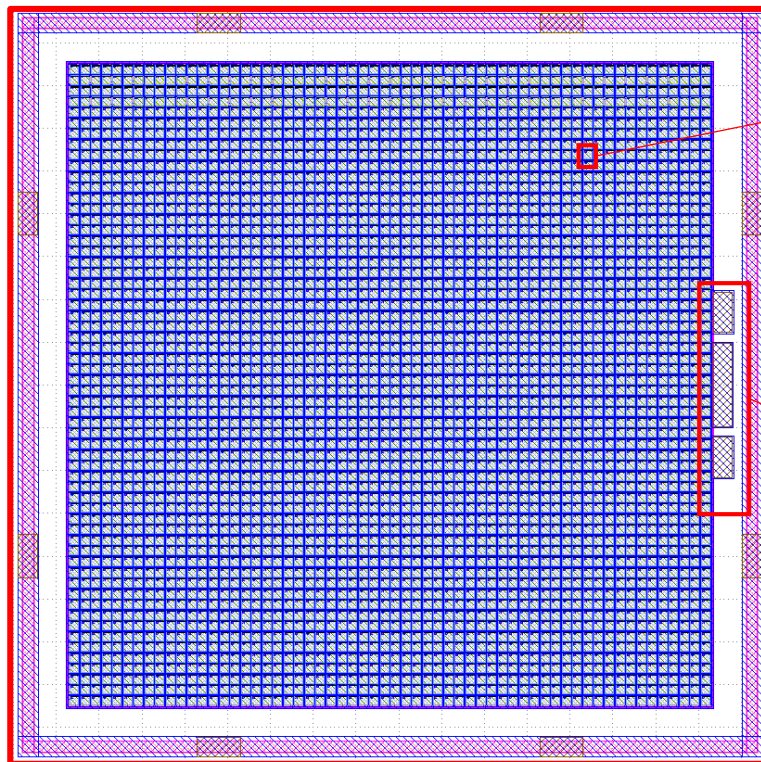
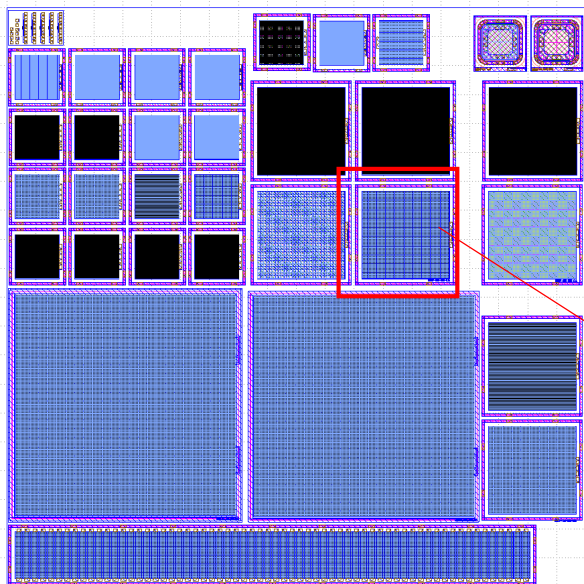
预生产的SiPM漏电流较大

- Pstop与GR结构设计存在小问题
- 通过仿真优化Pstop与GR结构降低漏电流

4. IHEP自研 SiPM 样品与性能测试

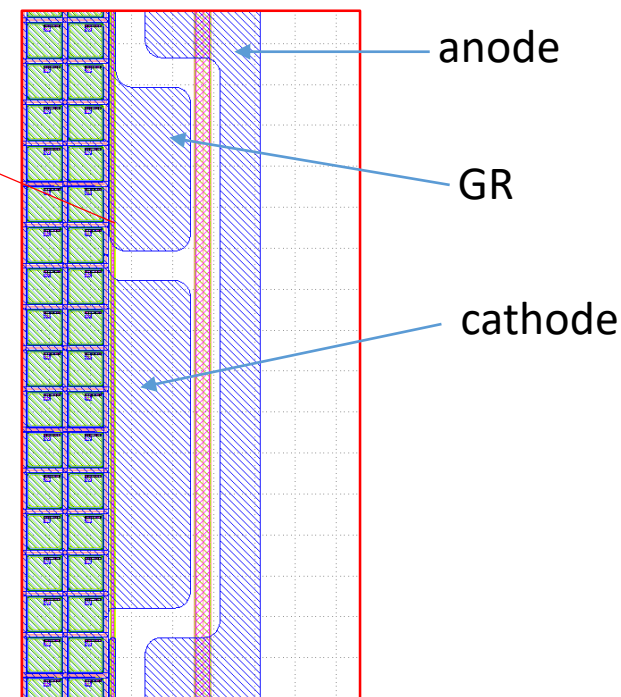


IHEP SiPM 版图



单像素参数:

- Pixel size 50um
- Quenching resistance 200KΩ



电极分布

正式流片计划:

- 10月底提交设计版图
- 年底完成第一版流片
- 2024年1-2月: 测试
- 2024年3-4月: 优化设计, 提交第二版流片

SiPM器件尺寸:

- 7.6 mm X 7.6 mm
- 3.0 mm X 3.0 mm
- 1.5 mm X 1.5 mm

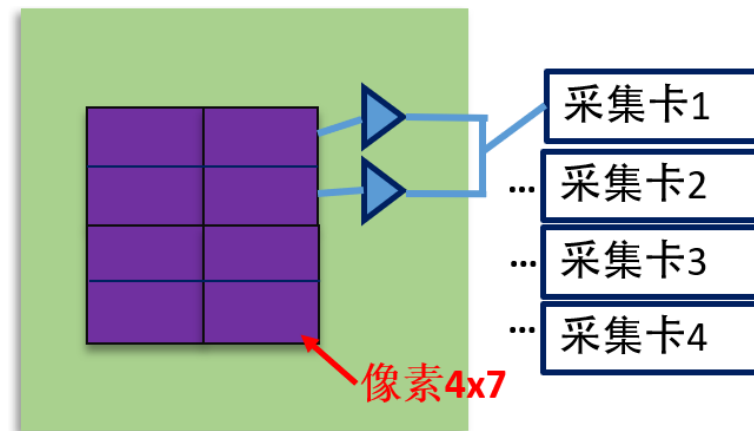
像素尺寸:

- 100um、50um、20um、10um

5. 总结

LGAD用于高能质子束能量测量

- LGAD探测器尺寸: $2\text{cm} \times 2\text{cm}$
- 时间分辨率 100ps
- 能量分辨率 $\sim 1\%$



工作进展

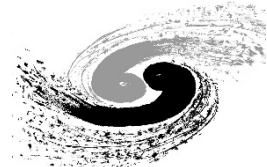
- 测试了 7×8 阵列一路读出, 时间分辨率最优 97ps
- 两组 5×5 器件合并一路读出, 时间分辨率可达 68ps

工作计划

- 在 15×15 探测器上, 验证两组 4×7 合并一路读出的方案
- 更多组的合并读出方案的实验验证
- 合并读出电路板设计

IHEP自研SiPM

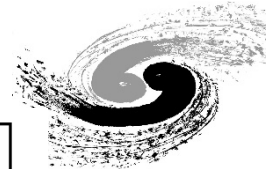
- 随LGAD预生产的SiPM样品, 结构设计和部分工艺得到验证
- 正式流片计划: 10月底提交设计版图, 年底完成第一版流片



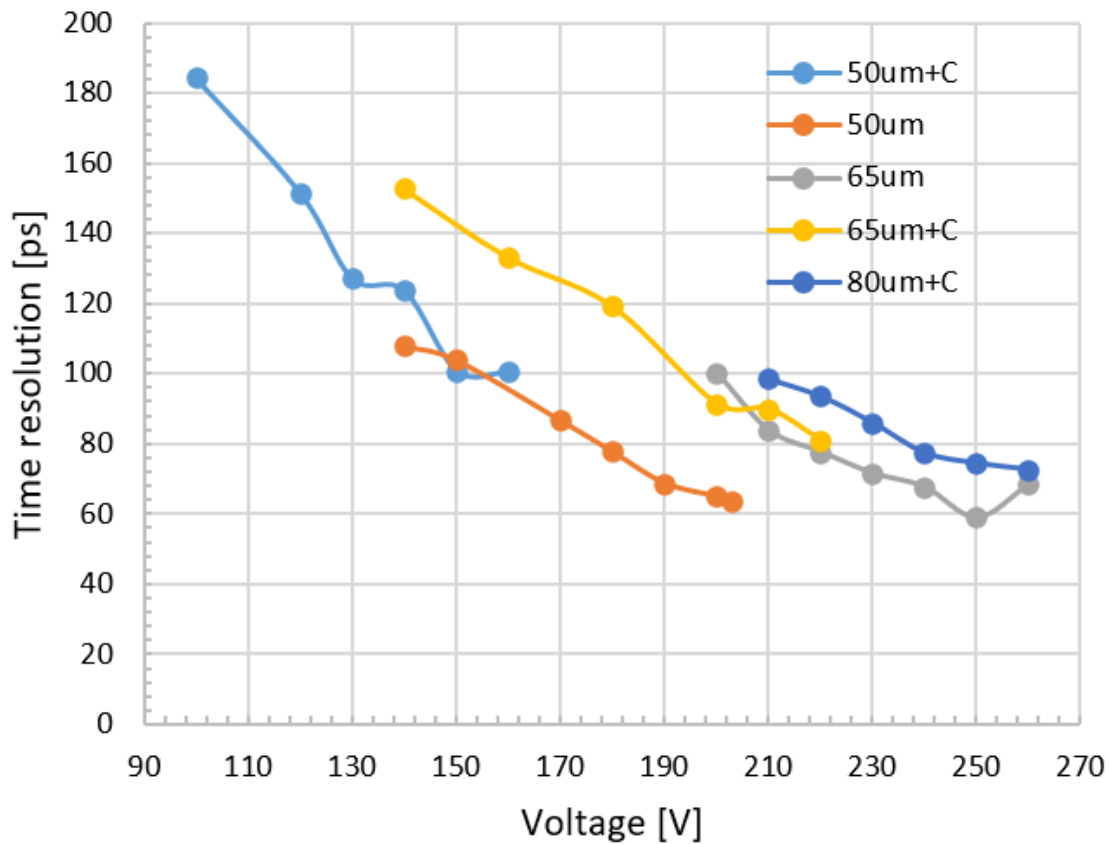


THANKS

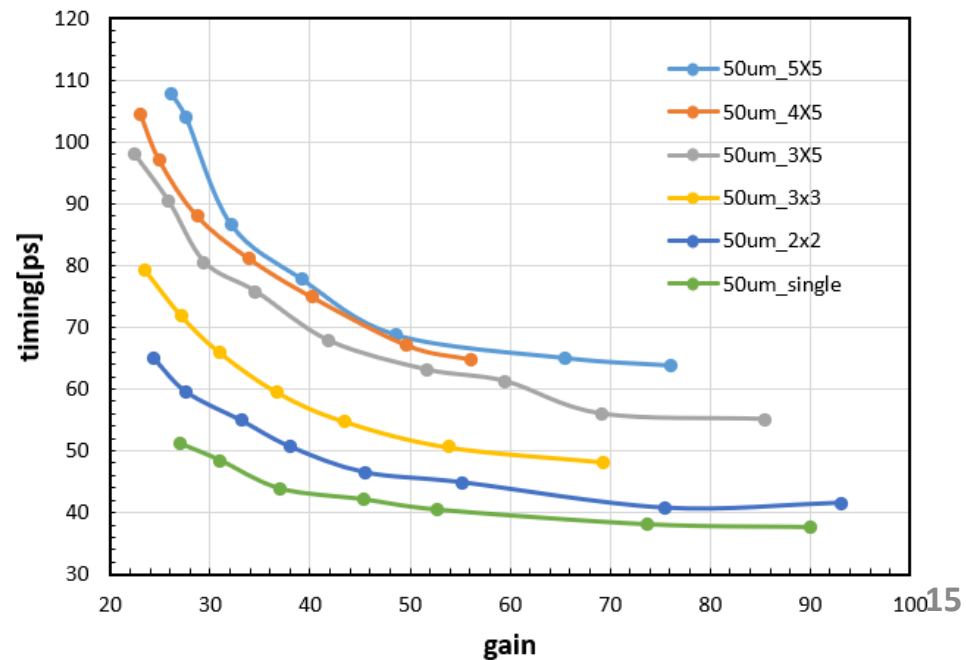
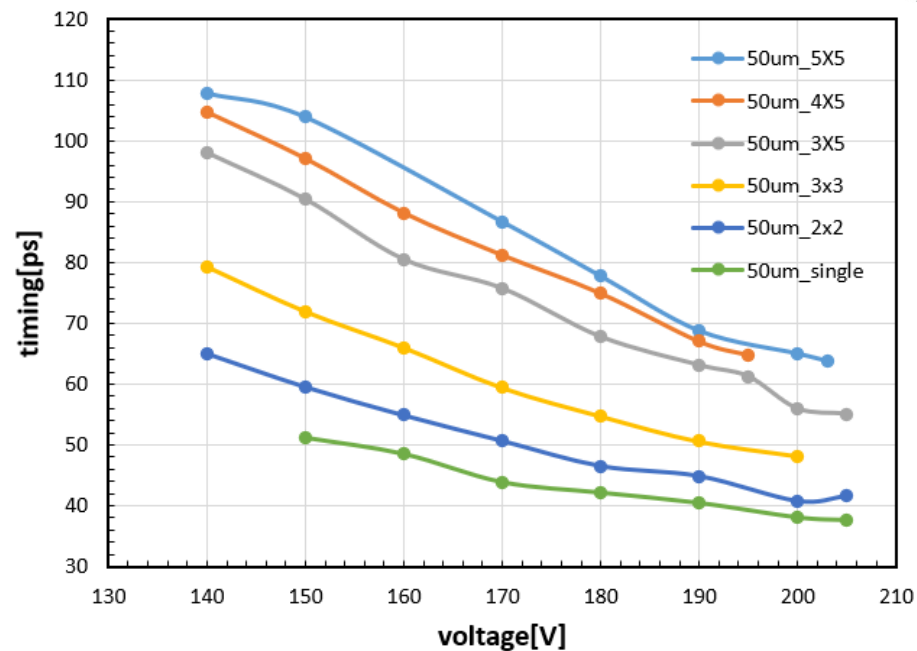
5x5 LGAD时间分辨率测试更新



5x5 LGAD



50um: 5x5 -> 1x1



LGAD能量测量系统

LGAD Energy Measurement System

