



# CEPC顶点探测器的SOI像素 传感器研究

吴志岗<sup>1,2,3</sup>, 卢云鹏<sup>1,2</sup>, 周扬<sup>1,2</sup>, 董静<sup>1,2</sup>, 宋龙龙<sup>1,2,3</sup>, 欧阳群<sup>1,2,3</sup>

1.核探测与核电子学国家重点实验室

2.高能物理研究所

3.中国科学院大学

# 提纲

- 背景介绍
  - CEPC顶点探测器设计要求与挑战
  - SOI像素传感器用于顶点探测器的可行性
- 基于Allpix<sup>2</sup>的空间分辨率模拟
- CPV2设计概念
- 基础性能测试
  - 传感器耗尽特性测试
  - 电路参数刻度
  - 噪声水平测试
- 基于聚焦激光束的空间分辨测试
  - 实验装置配置
  - 激光束响应
  - 空间分辨测试结果
- 年度进展总结

# CEPC顶点探测器设计要求与挑战

**Table 6.1** Required performance of the CEPC sub-detectors for critical benchmark Higgs processes.

Physics Process	Measured Quantity	Critical Detector	Required Performance
$ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- X$	Higgs mass, cross section	Tracker	$\Delta(1/p_T) \sim 2 \times 10^{-5}$
$H \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$\text{BR}(H \rightarrow \mu^+ \mu^-)$		$\oplus 1 \times 10^{-3} / (p_T \sin \theta)$
$H \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, gg$	$\text{BR}(H \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, gg)$	Vertex	$\sigma_{r\phi} \sim 5 \oplus 10 / (p \sin^{3/2} \theta) \mu\text{m}$
$H \rightarrow q\bar{q}, VV$	$\text{BR}(H \rightarrow q\bar{q}, VV)$	ECAL, HCAL	$\sigma_E^{\text{jet}} / E \sim 3 - 4\%$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$\text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma)$	ECAL	$\sigma_E \sim 16\% / \sqrt{E} \oplus 1\% (\text{GeV})$

- 探测器应具有对b-/c-jet以及τ轻子很好的鉴别能力

– 应具有小的impact parameter resolution  $\sigma(r\phi) = a \oplus \frac{b}{p(\text{GeV}) \sin^{3/2} \theta} \mu\text{m}$  a=5, b=10

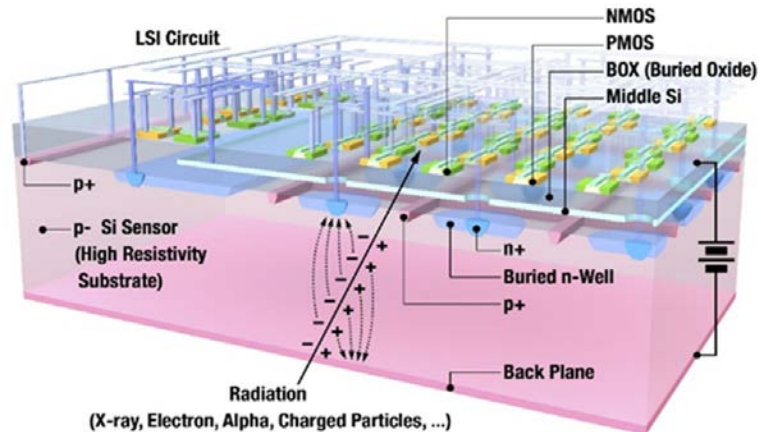
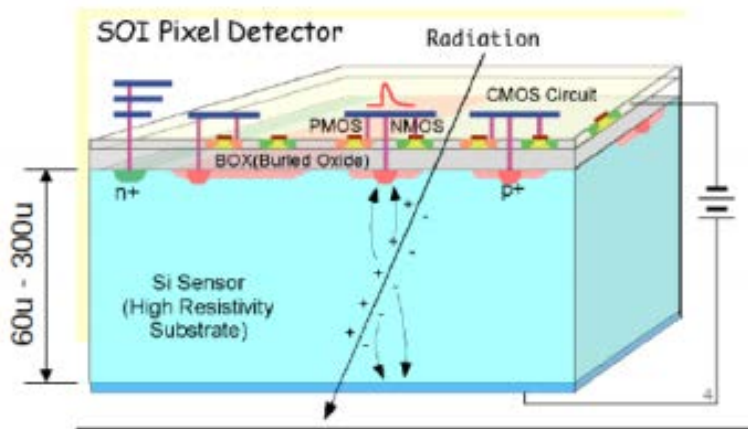
- 顶点探测器设计要求

- 最内层探测器空间分辨优于3um(2.8um) -----> 小像素
- 探测器的物质的量低于0.15% X0/layer -----> 薄、低功耗
- 最内层探测器距离对撞顶点近(16mm) -----> 快读出、抗辐照

像素尺寸小、传感器厚度薄、具有像素内甄别器的数字读出芯片

# SOI像素传感器

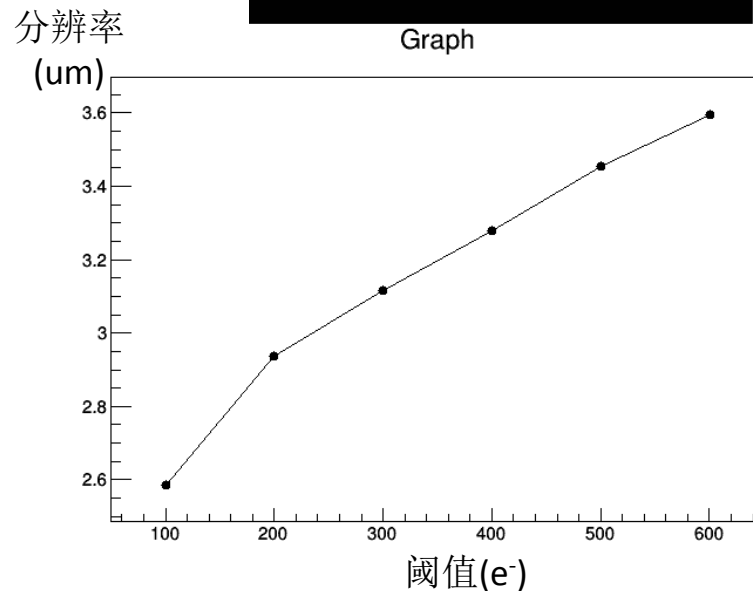
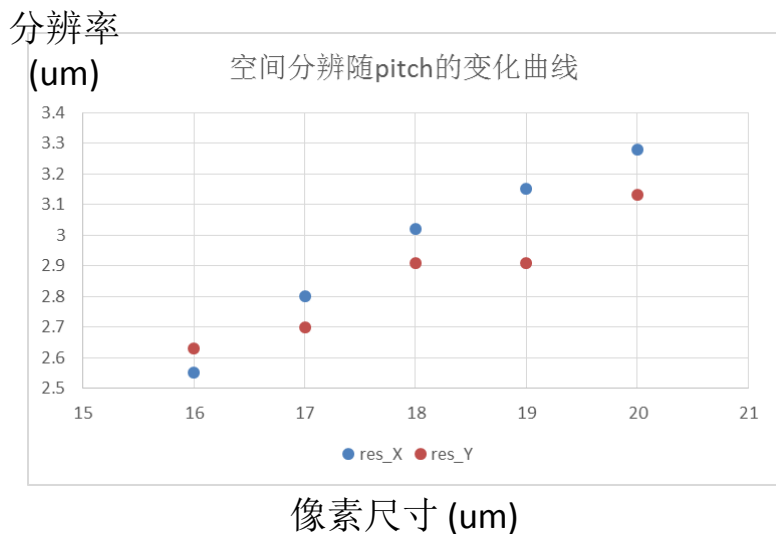
- 用于CEPC顶点探测器的可行性分析
  - 电路层工业级的0.2 $\mu\text{m}$  CMOS工艺
  - 高阻的衬底（大于10k $\Omega\text{cm}$ ）,易实现传感器全耗尽
  - 像素尺寸可以做得很小（小于10 $\mu\text{m}$ ）
  - 传感器厚度可以减薄到50 $\mu\text{m}$
  - Double SOI结构可以有效解决电荷收集极与电路层间的串扰
  - Double SOI结构可以加补偿电压以减少TID效应的不利影响



© Rey. Hori

# 基于Allpix<sup>2</sup>的空间分辨率模拟

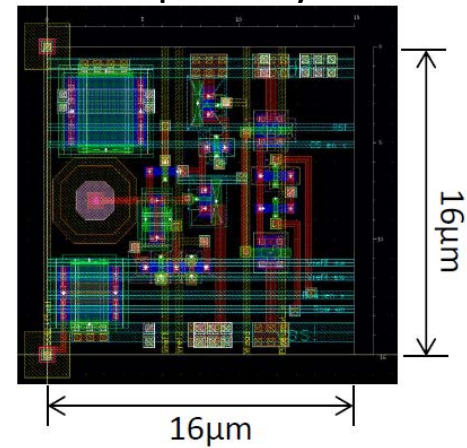
- Allpix<sup>2</sup>介绍
  - 模拟载流子在传感器中的输运过程
- 空间分辨率模拟
  - 随像素尺寸变化
    - 阈值200e<sup>-</sup>
    - X方向垂直入射，Y方向偏10°
  - 随阈值变化
    - 像素尺寸16 $\mu\text{m}$



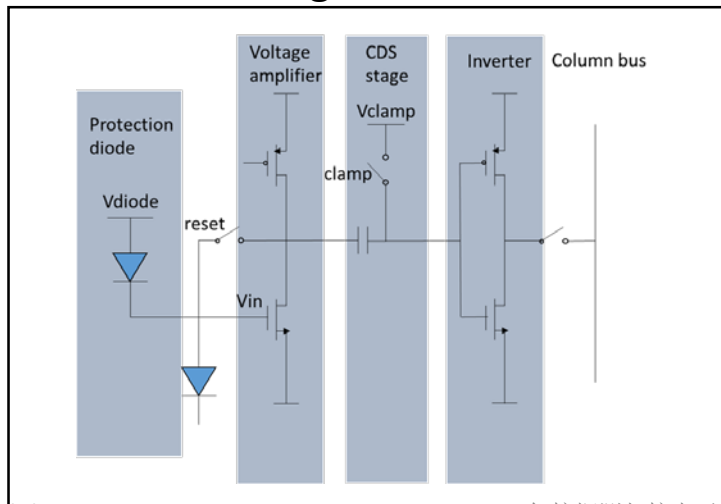
# CPV2设计概念

- Double SOI圆晶
  - P型高阻衬底（约 $1\text{k}\Omega\text{cm}$ ）
  - 传感器减薄到 $75\mu\text{m}$
- 像素内甄别的小像素阵列
  - $16\mu\text{m}$ 的像素尺寸及数字读出以实现 $3\mu\text{m}$ 以下的空间分辨
  - 像素内甄别器保证连续工作模式下的低功耗
  - 电路包含前放、相关双采样电路（CDS）以及甄别器
  - 一半的像素阵列为模拟读出（以进行电路参数刻度）

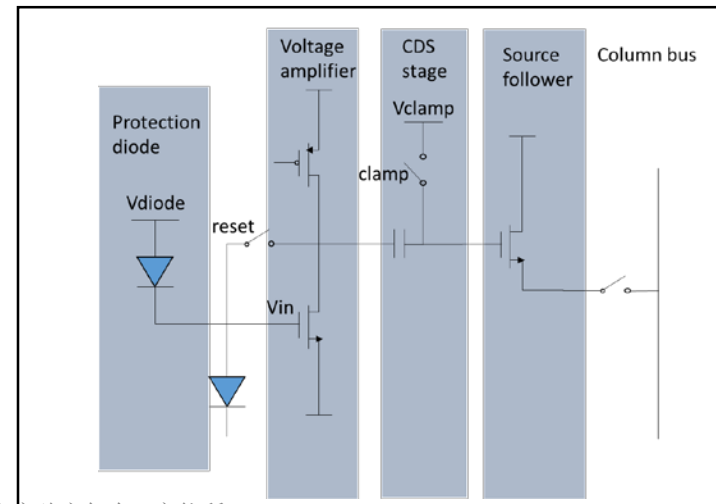
CPV2 pixel layout



CPV2 digital blocks



CPV2 analog blocks

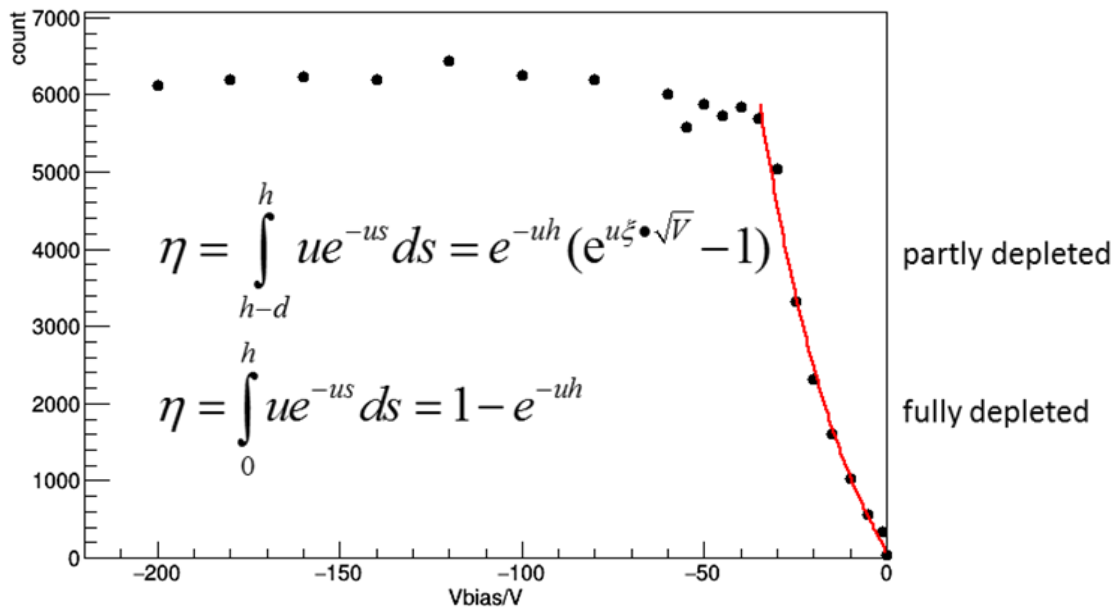
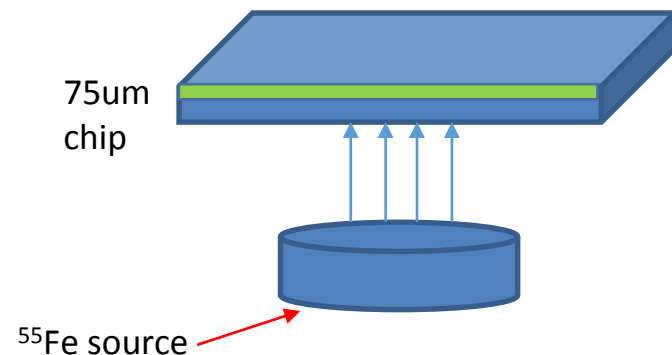


# 提纲

- 背景介绍
  - CEPC顶点探测器设计要求与挑战
  - SOI像素传感器用于顶点探测器的可行性
- 基于Allpix<sup>2</sup>的空间分辨率模拟
- CPV2设计概念
- 基础性能测试
  - 传感器耗尽特性测试
  - 电路参数刻度
  - 噪声水平测试
- 基于聚焦激光束的空间分辨测试
  - 实验装置配置
  - 激光束响应
  - 空间分辨测试结果
- 年度进展总结

# 传感器耗尽特性测试

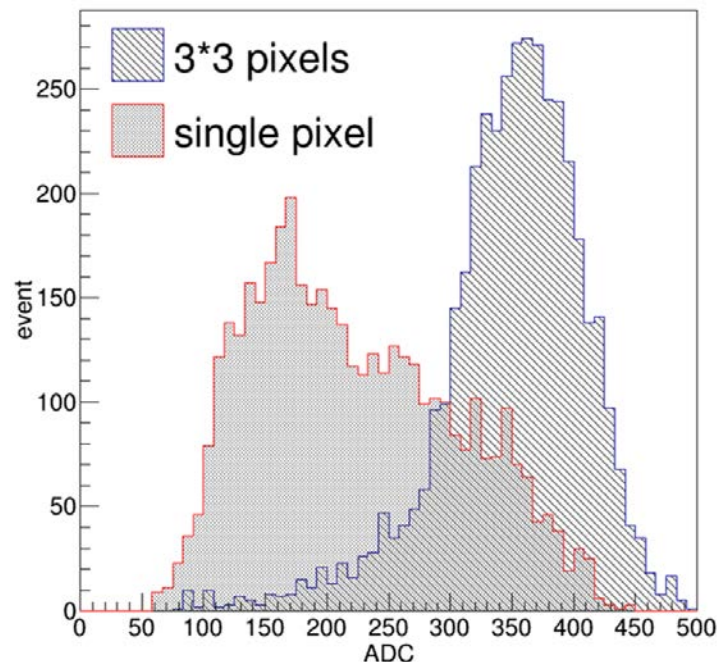
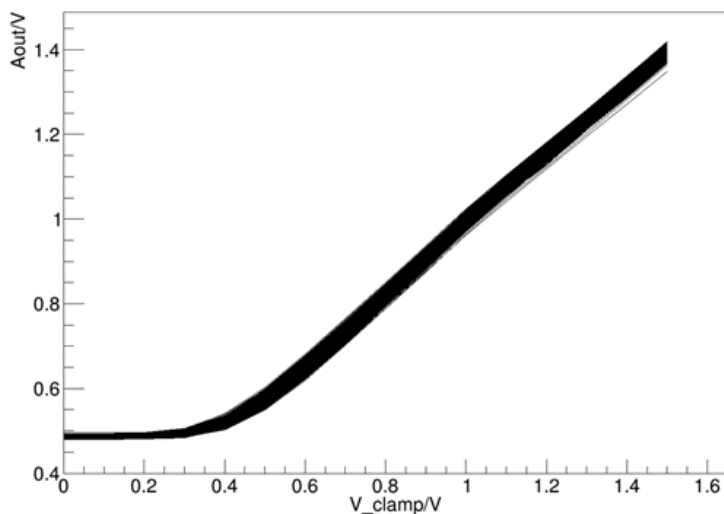
- $^{55}\text{Fe}$ 放射源5.9KeV X射线背入射测试
  - 芯片厚度为75um
  - X射线从探测器背面照射
  - 测量芯片计数率随所加偏压的关系
  - 当偏压大于30V时，计数不随偏压而变化
  - 传感器全耗尽的直接证据





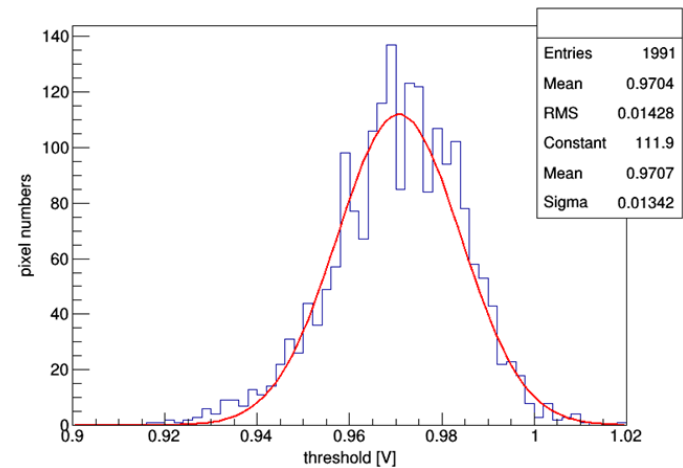
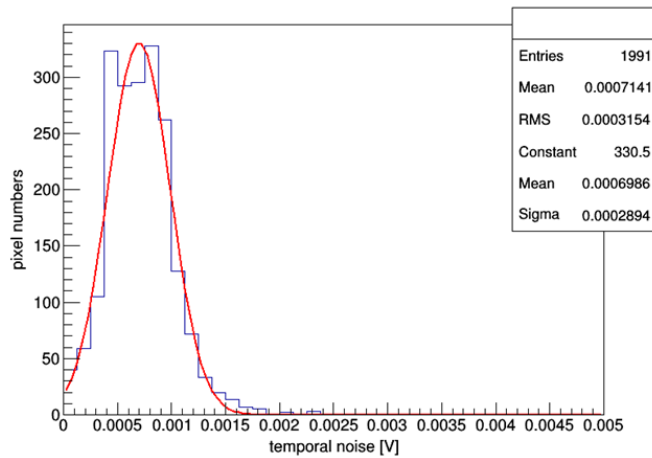
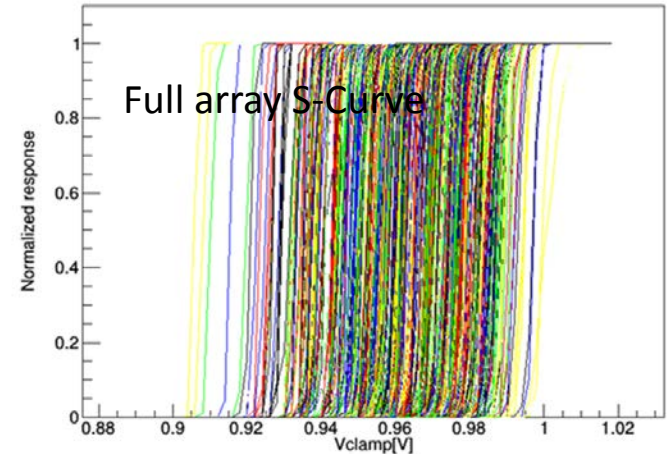
# 电路参数刻度

- 模拟像素测量电荷电压转换系数（CVF）
  - $^{55}\text{Fe}$  5.9KeV X射线源
  - 单像素收集电荷量的最大值位于180道ADC处
  - $3 \times 3$ 的簇团收集电荷量的最大值位于360道ADC处（ $\nu$ ）
  - 测量模拟电路中源极跟随器的平均增益：0.87
  - CVF:  $123.3\mu\text{V}/e^-$  @源极跟随器的输入端



# 噪声水平测试

- 瞬态噪声（TN）与阈值不一致性（FPN）
  - 方法：全阵列S-curve曲线的方法
  - 平均瞬态噪声（TN） $\sim 6e-$
  - 阈值不一致性（FPN） $\sim 114e-$
  - 单像素阈值最低可设为 $100e-$

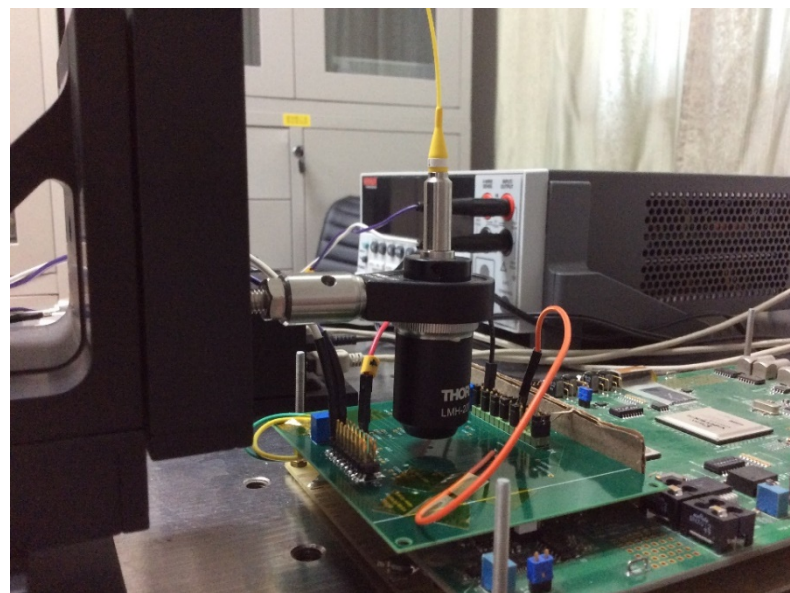
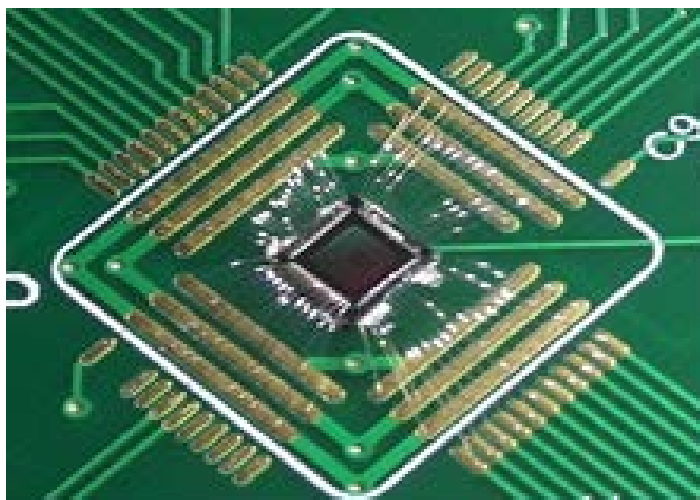
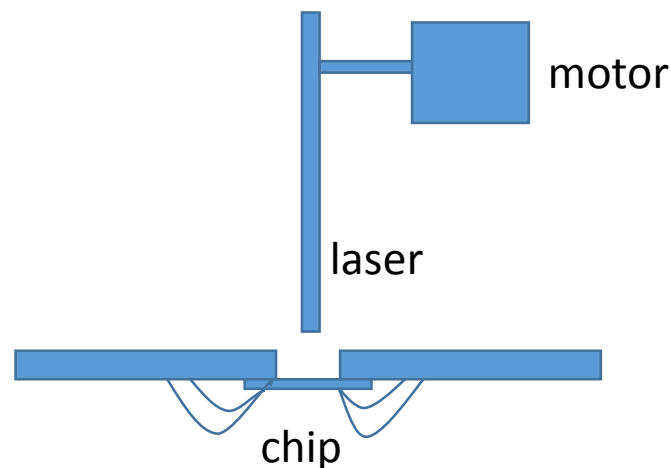


# 提纲

- 背景介绍
  - CEPC顶点探测器设计要求与挑战
  - SOI像素传感器用于顶点探测器的可行性
- 基于Allpix<sup>2</sup>的空间分辨率模拟
- CPV2设计概念
- 基础性能测试
  - 传感器耗尽特性测试
  - 电路参数刻度
  - 噪声水平测试
- 基于聚焦激光束的空间分辨测试
  - 实验装置配置
  - 激光束响应
  - 空间分辨测试结果
- 年度进展总结

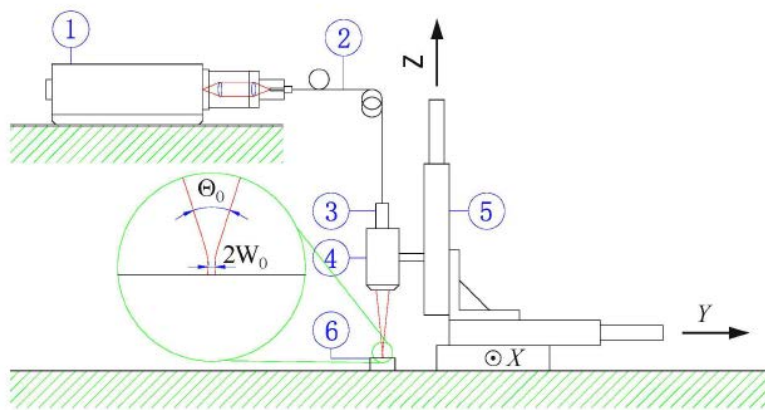
# 实验装置配置

- 1064nm 红外激光束
  - 光学透镜聚焦激光束
- 3维高精度步进电机控制激光位置
  - 位置精度0.1 $\mu\text{m}$
- CPV2芯片
  - 芯片wire-bonding到子板上
  - 激光束可以从传感器背面入射（背面没有铝层）

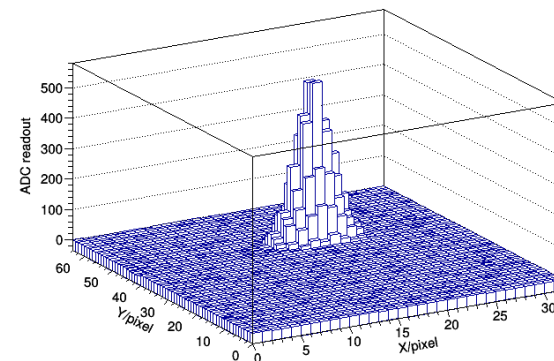


# 激光束响应

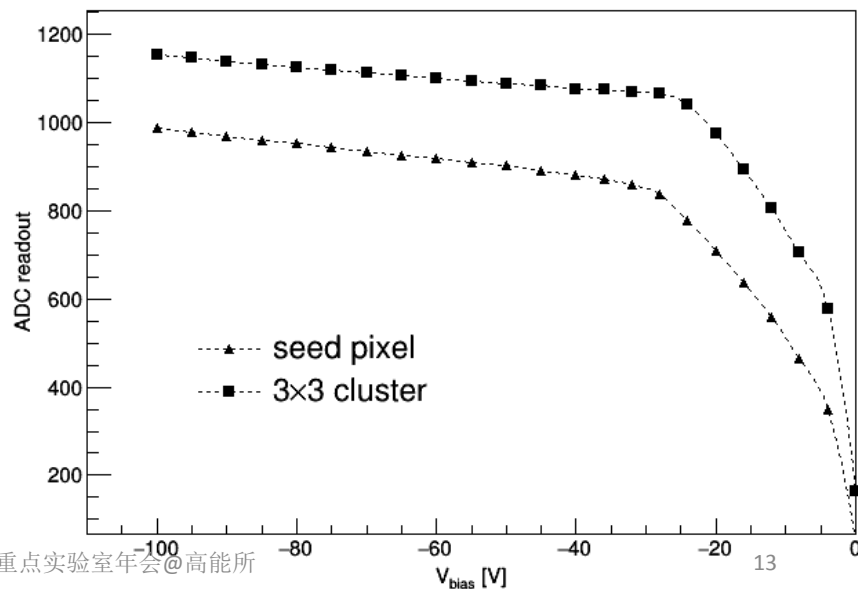
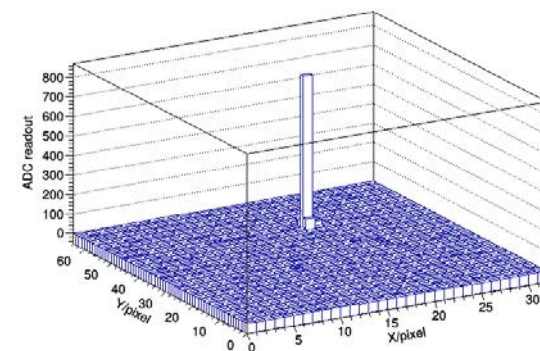
- 时序控制
  - 用每帧开始的信号进行触发
  - 与rolling shutter同步读出
- 聚焦方法
  - 用模拟像素部分作为参考探测器
  - 实现最小的簇团像素数目
  - 激光束腰宽度约为 $3.4\mu\text{m}$
- 激光信号强度随偏压的变化
  - 耗尽特性与之前结论相一致



聚焦前

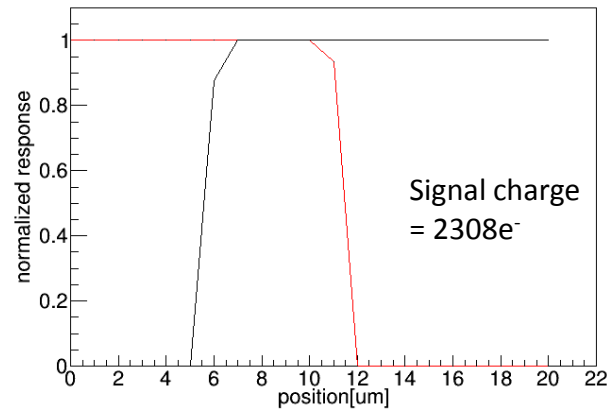
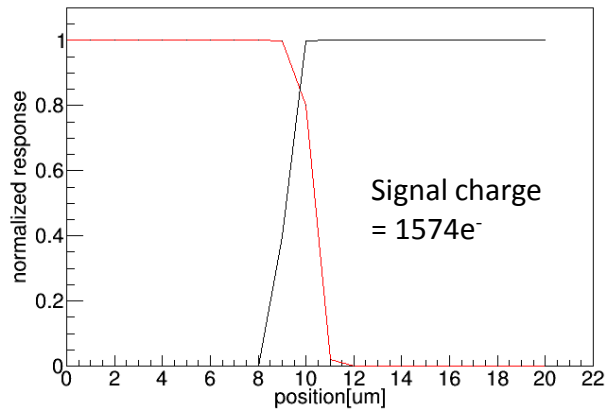
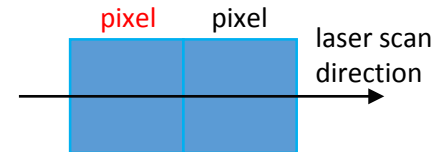


聚焦后

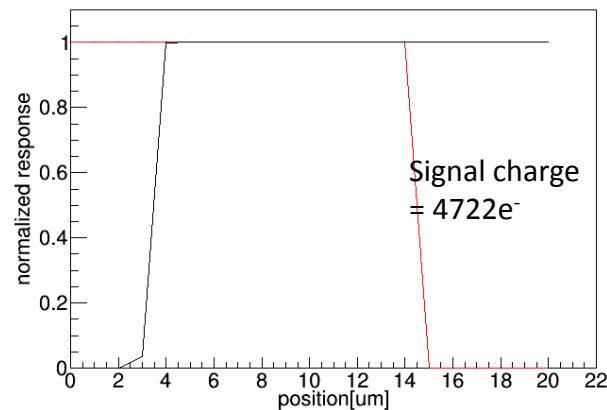
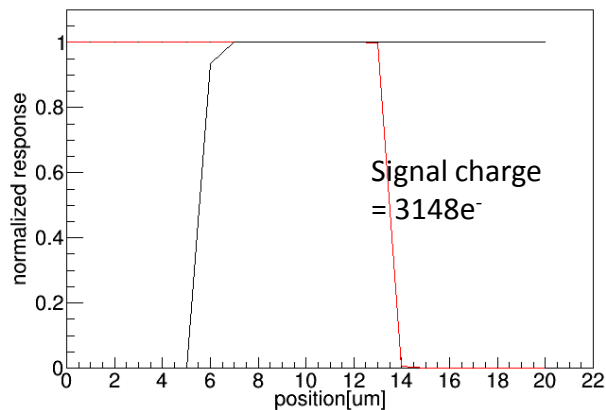


# 空间分辨测试

- 激光扫描两相邻数字像素
  - 扫描步长1 $\mu\text{m}$
  - 阈值固定（无噪声计数）

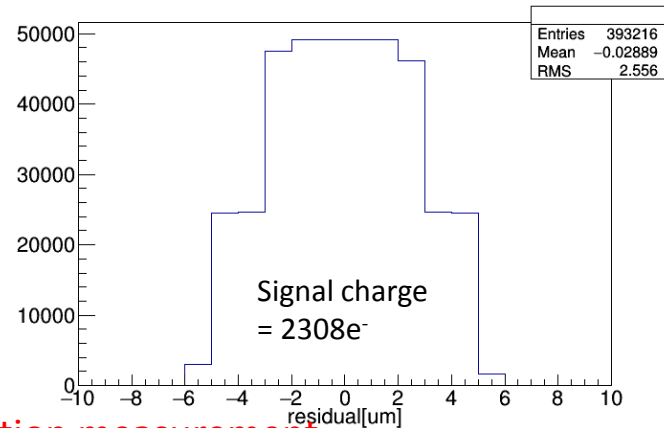
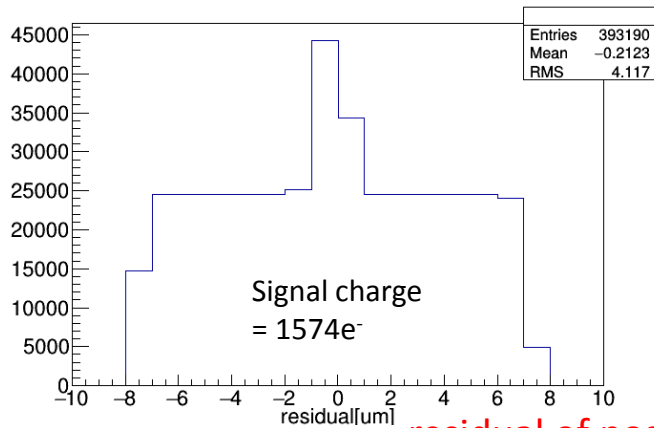


Normalized response  
= 像素响应数 / 激光脉冲数

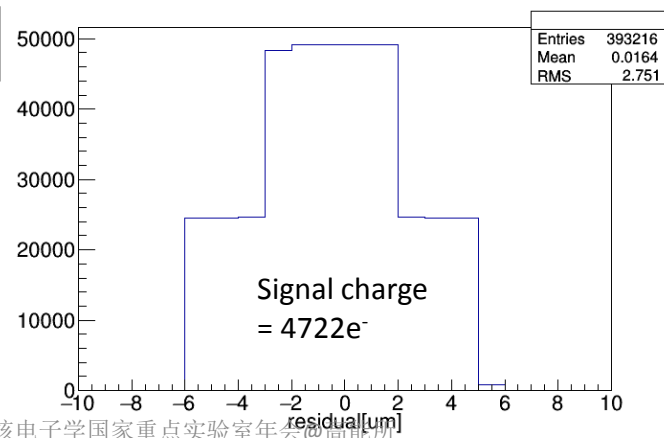
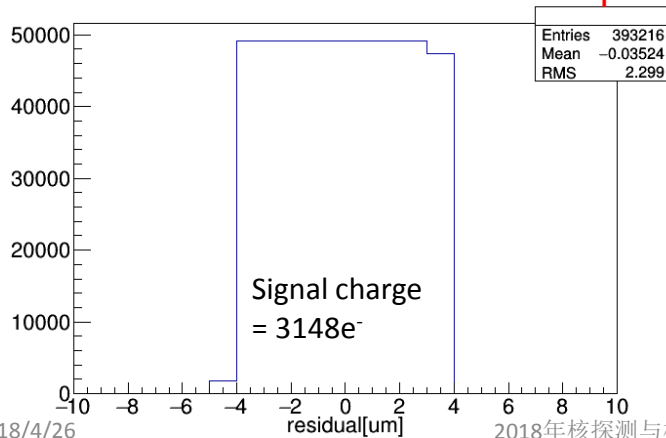


# 空间分辨测试

- 空间分辨由实际位置与测量位置的残差分布得到
  - 实际位置由步进电机决定
  - 测量位置由重心法重建得到

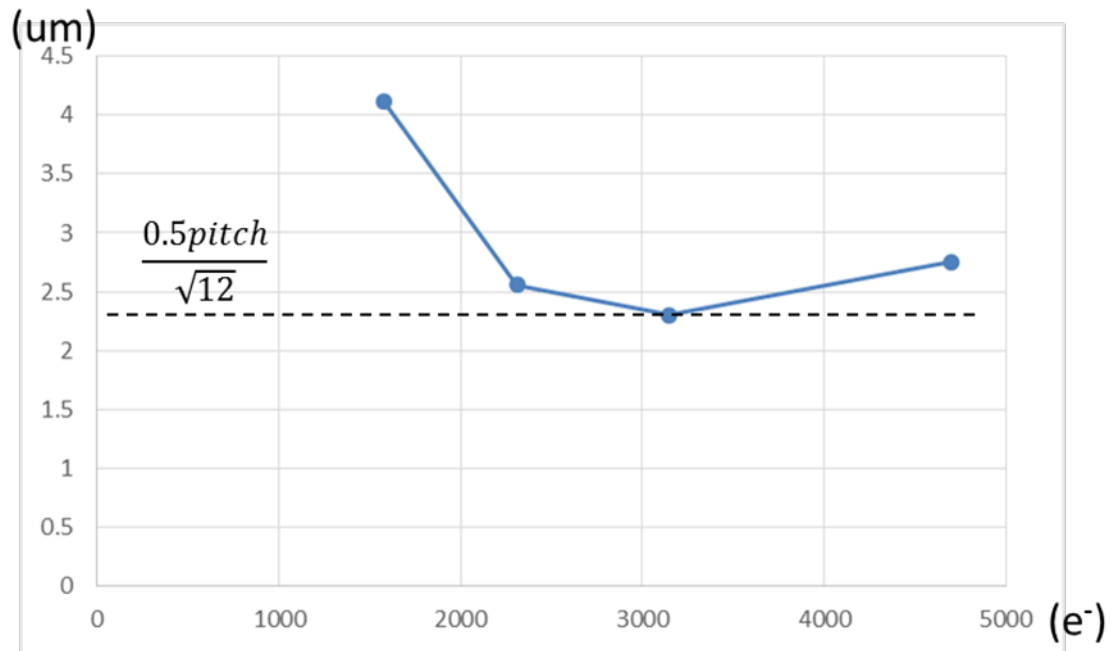


residual of position measurement



# 空间分辨测试

- 空间分辨率随信号强度的变化关系
  - 在大约3000e-的信号水平处达到最佳的空间分辨率——2.3um





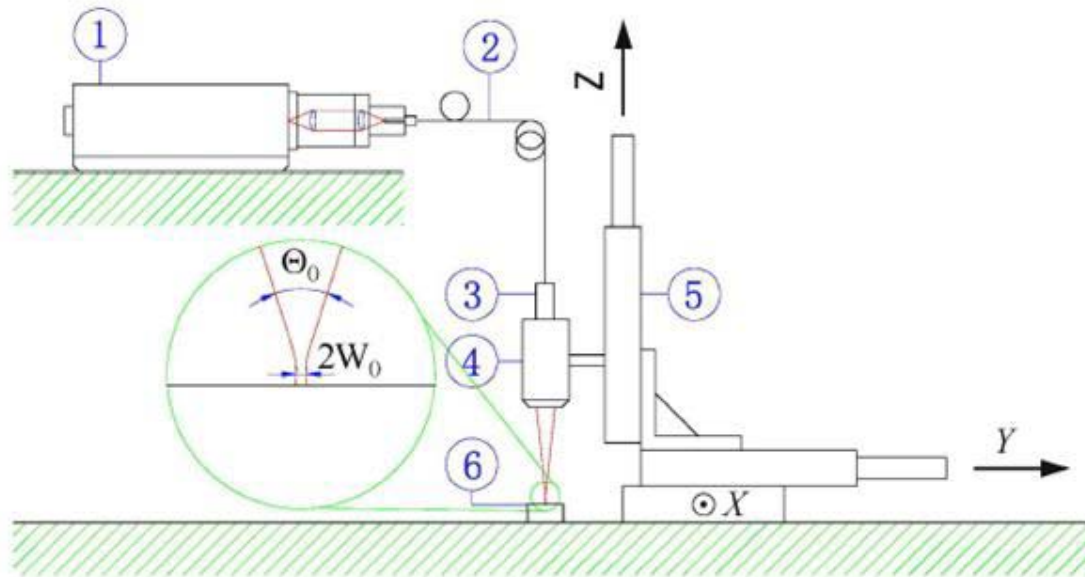
# 年度进展总结

- 为CEPC顶点探测器预研的SOI像素探测器——CPV2
  - 16 $\mu\text{m}$ 像素尺寸、75 $\mu\text{m}$ 厚、数字读出的Double SOI芯片
  - 验证了减薄工艺的可行性
  - 验证了在-30V偏压时实现全耗尽
  - 实现了低的单像素瞬态噪声 $\sim 6e^-$
  - 验证了激光束下的空间分辨率小于3 $\mu\text{m}$
- 下一款芯片——CPV3已在研究中
  - 将解决CPV2中存在的问题
  - 相关传感器和电子学模拟工作已在进行中
  - 计划对CPV3进行束流实验

谢谢！

# 附录

- 束腰宽度的计算



$$\tan \frac{\theta_0}{2} = \frac{D}{2F}.$$

$$2\omega_0 = \frac{4\lambda}{\pi\theta_0} \approx \frac{4\lambda F}{\pi D}.$$