

用于高能物理实验的单片高压 CMOS(HV-CMOS)像素粒子探测器

张晨凡

利物浦大学 物理学院

chenfan@liverpool.ac.uk



UNIVERSITY OF
LIVERPOOL

2024年12月26日

2015

-

2017

2017

-

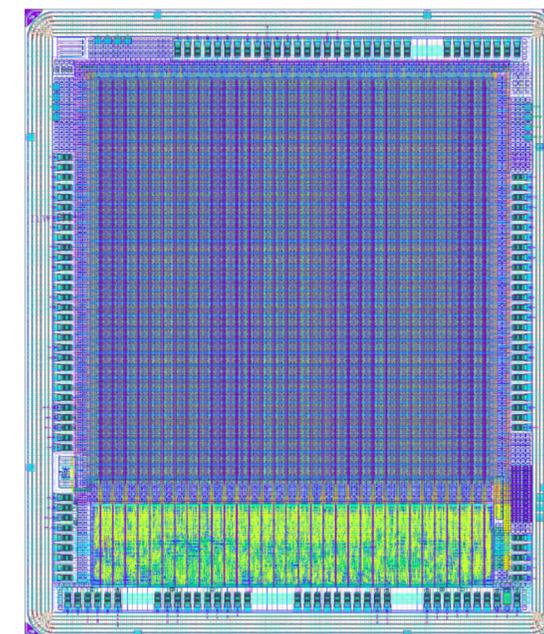
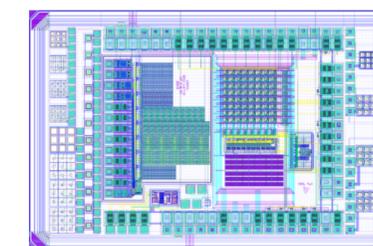
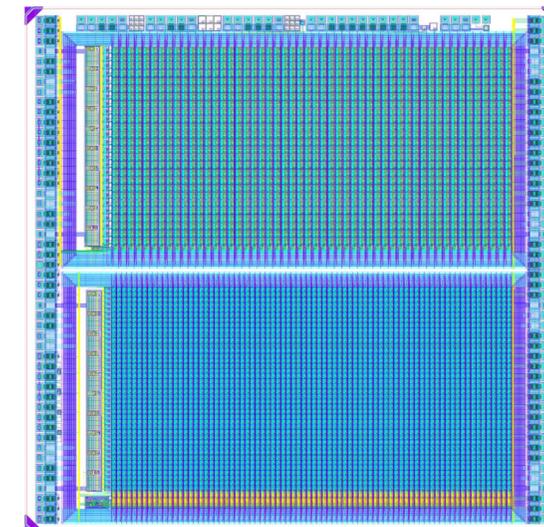
2020

2020

-

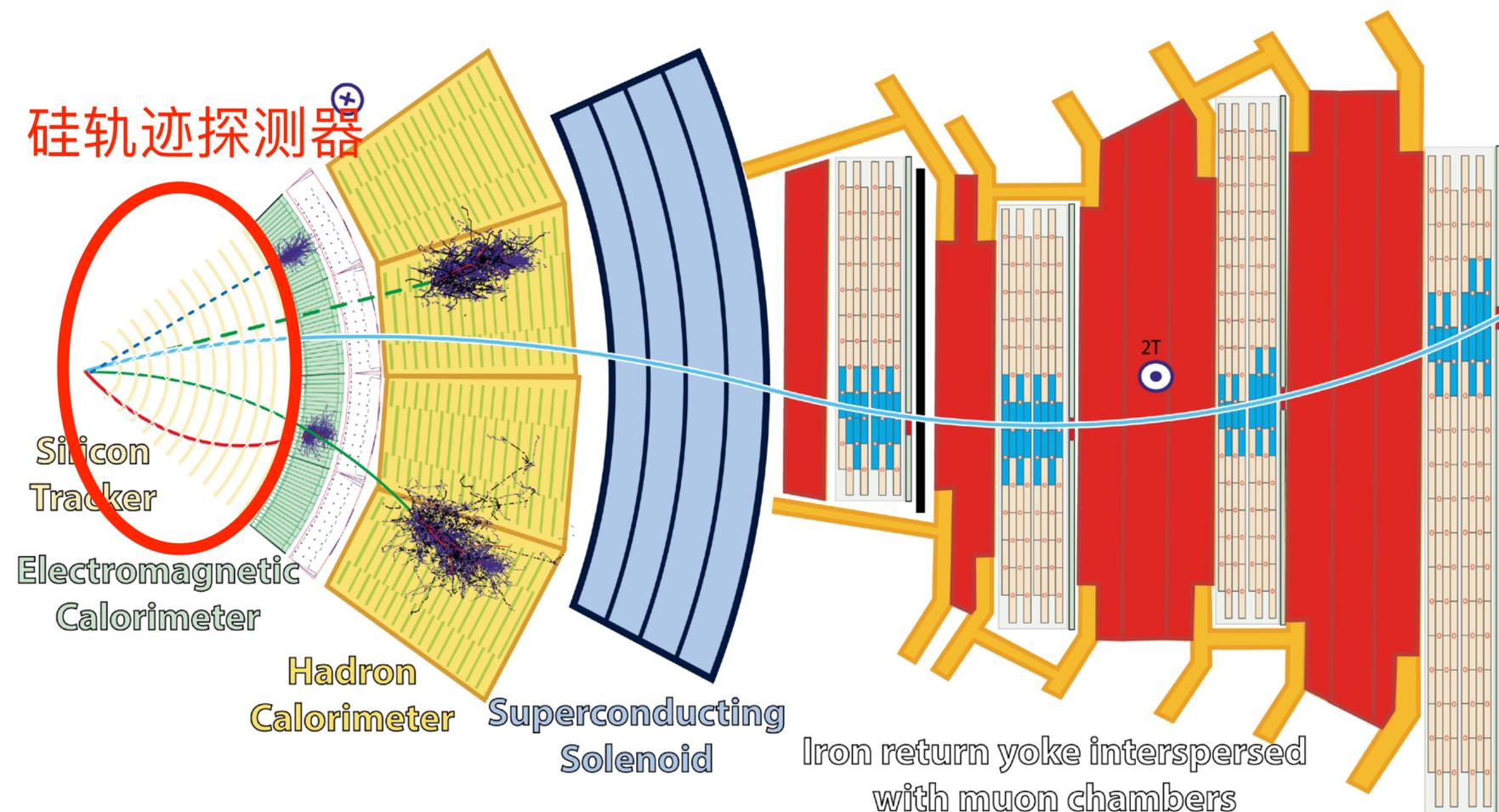
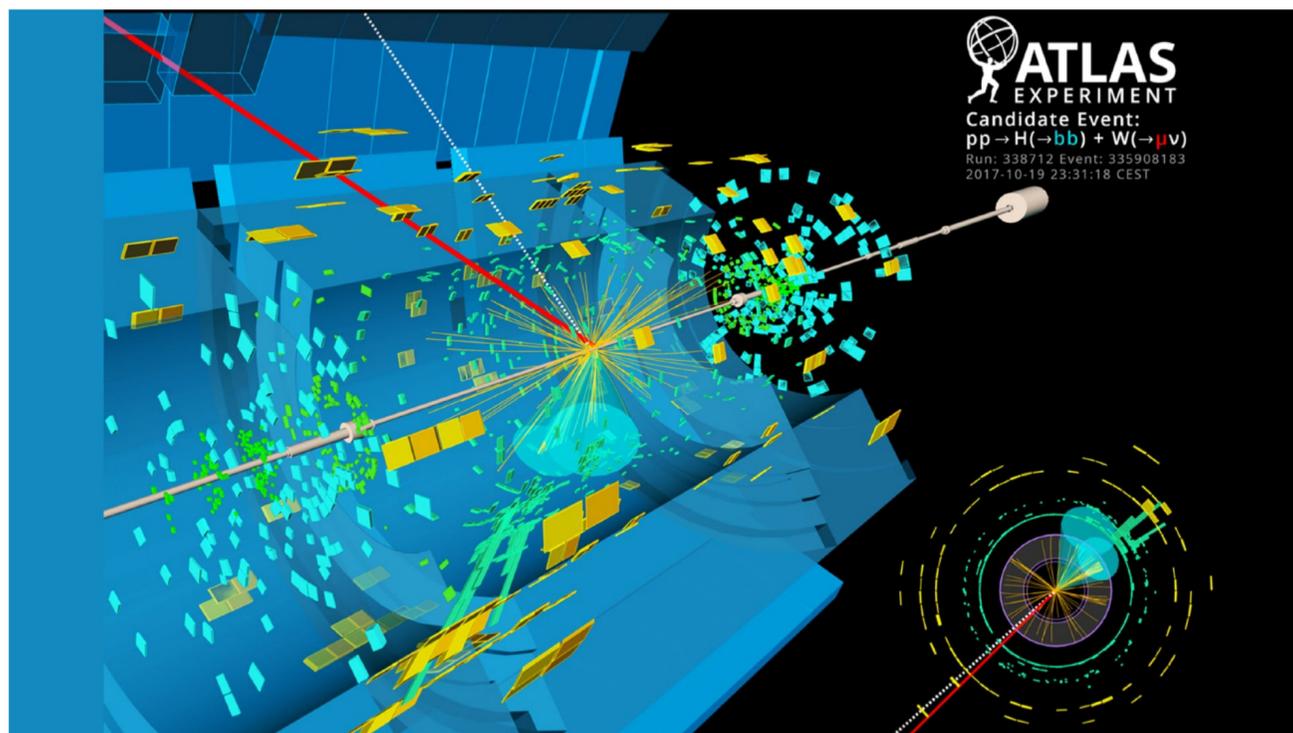
至今

- 居里夫人青年研究员 (Marie Curie Early Stage Researcher) @ 利物浦大学
 - 研制了RD50-MPW1: 第一款带有像素内数字读出电路的单片高压CMOS (HV-CMOS)粒子探测器 (~ 60 V)。
- 物理学博士研究生 @ 利物浦大学
 - 研制了RD50-MPW2 与 UKRI-MPW0, 将HV-CMOS的可承受电压升高到了120 V, 进一步提升了抗辐照性能。
- 研究员 @ 利物浦大学
 - 研制了RD50-MPW3, RD50-MPW4 与 UKRI-MPW1, 将可承受电压升高到了600 V以上, 实现了拥有完整数字读出的HV-CMOS探测器。



- 硅高能粒子探测器
- 硅像素探测器
 - 混合式 (Hybrid)
 - 单片式 (Monolithic)
 - 单片高压CMOS (Monolithic HV-CMOS)
- RD50-MPW4
 - 设计
 - 测试结果
- 总结

对撞机实验中粒子轨迹的记录



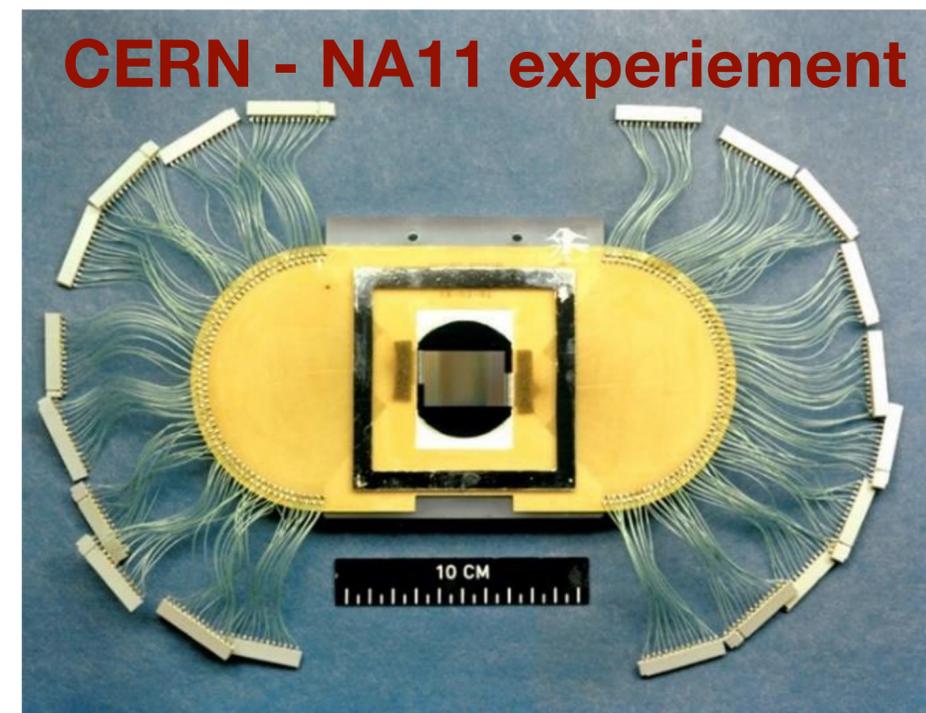
- Muon
- Electron
- Charged hadron (e.g. pion)
- - - Neutral hadron (e.g. neutron)
- - - Photon



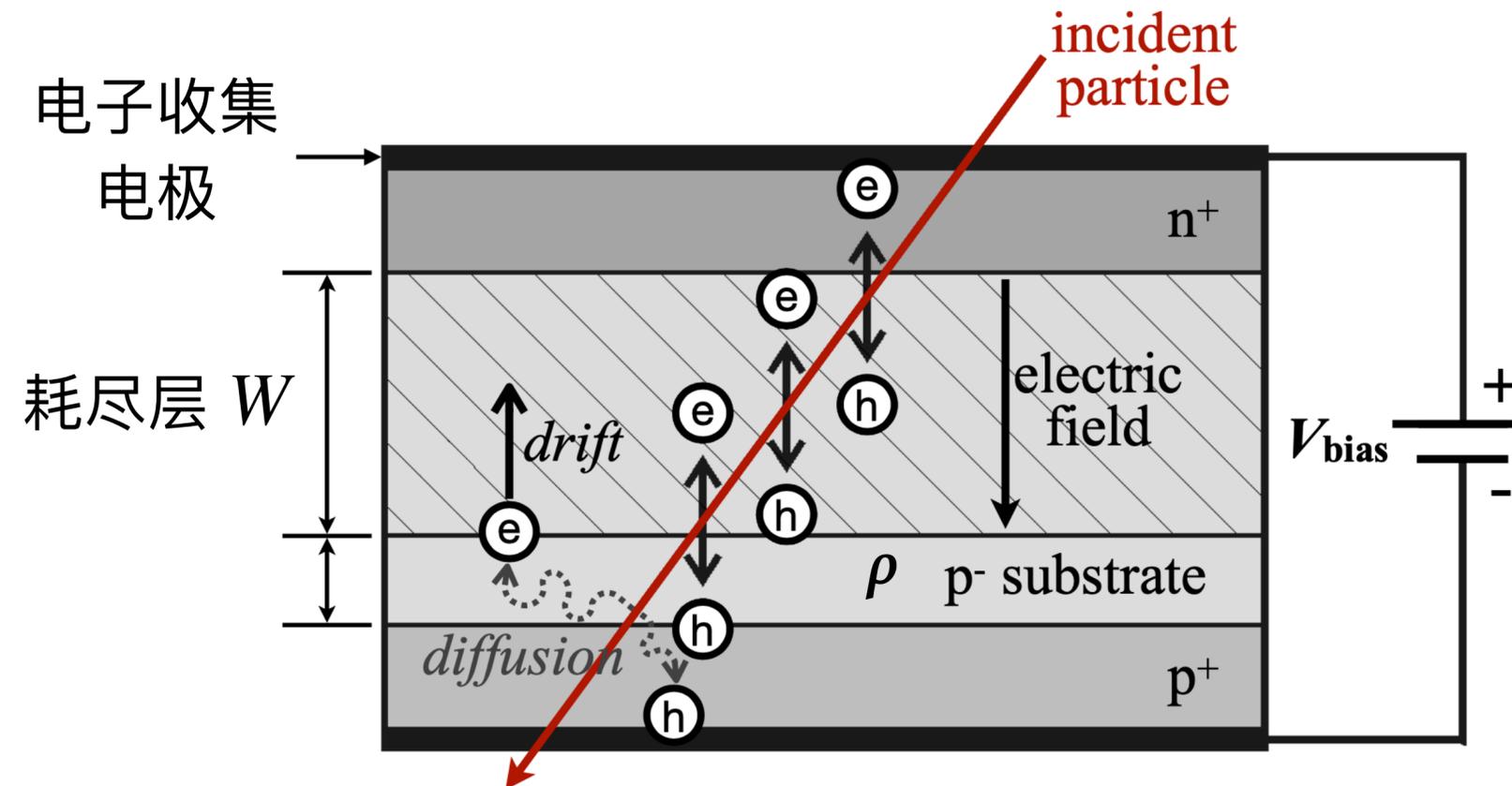
- 像素大小
- 抗辐射性能
- 时间分辨率
- 物质质量
- 功耗
- 噪声
- 单探测器面积大小
- 集成工艺难易程度
- 良率



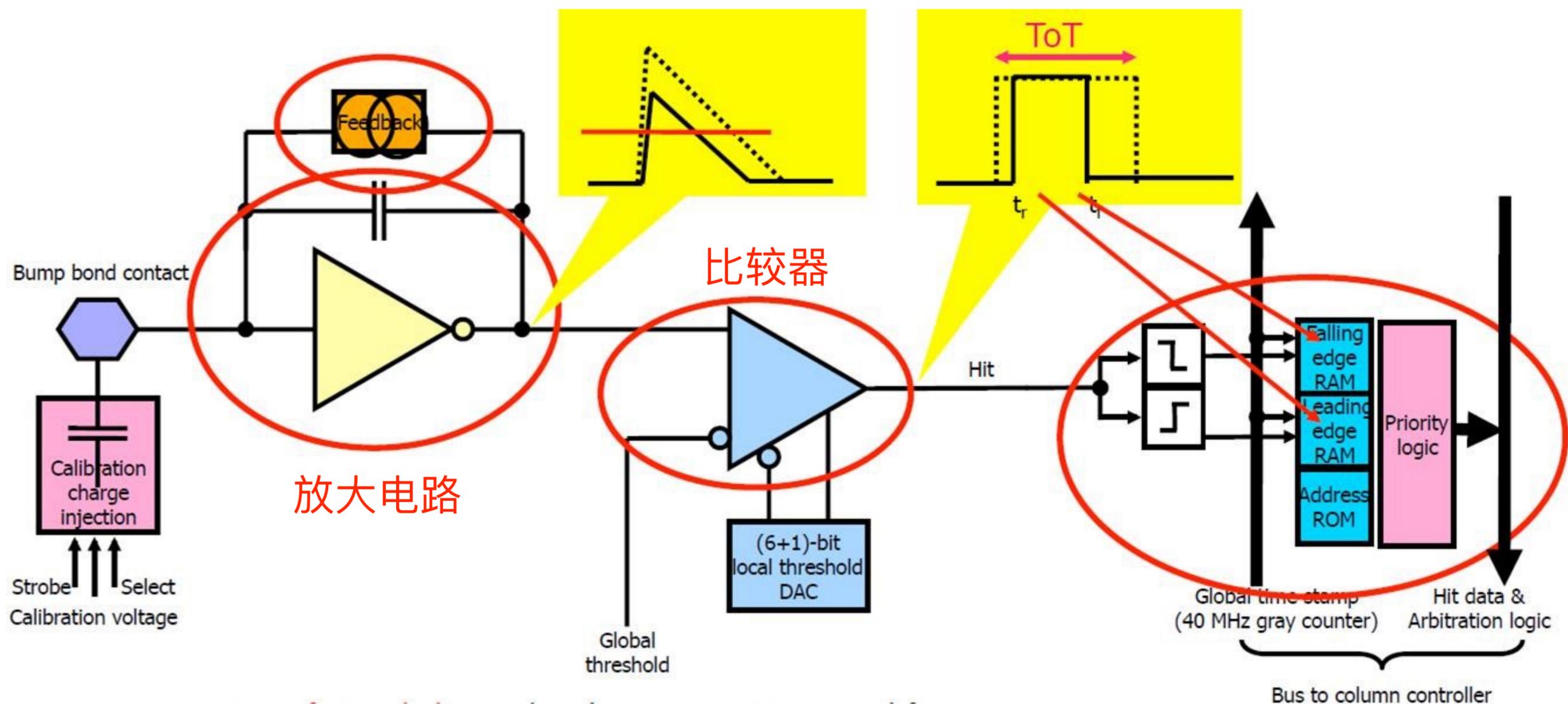
- 从80年代开始, 在高能物理实验里被应用.
- 相对于当时探测器, 极大提高了的空间精度:
 - Multi-wire proportional chambers ($< 1 \text{ mm}$)
 - Drift chambers ($\sim 100 \mu\text{m}$)
- 两种硅轨迹探测器的变种:
 - 硅微条 ($\sim 10 \mu\text{m}$)
 - $100 / \text{cm}^2$
 - 硅像素 ($\sim 10 \mu\text{m}$)
 - $5000 / \text{cm}^2$
 - 3维轨迹探测
 - 有能力应对高密度, 高速率的粒子束
 - 抵抗高强度的辐射环境 -> 能被应用在靠近对撞点的空间



- 对PN二极管加反相偏置电压, 在PN结之间形成耗尽层 (没有自由电子/空穴).
- 耗尽层厚度 $W \propto \sqrt{V_{bias} \cdot \rho}$.
- 高能带电粒子与硅通过电离产生自由电子/空穴对.
- 在耗尽层中产生的电子/空穴, 在偏执电压形成的电场的作用下向电极漂移.
- 电极收集的电子或空穴形成电信号.
- 辐射在硅材料中产生伤害, 减少耗尽层厚度, 维持耗尽层 \rightarrow 增大偏置电压 V_{bias} , 基底电阻 ρ .

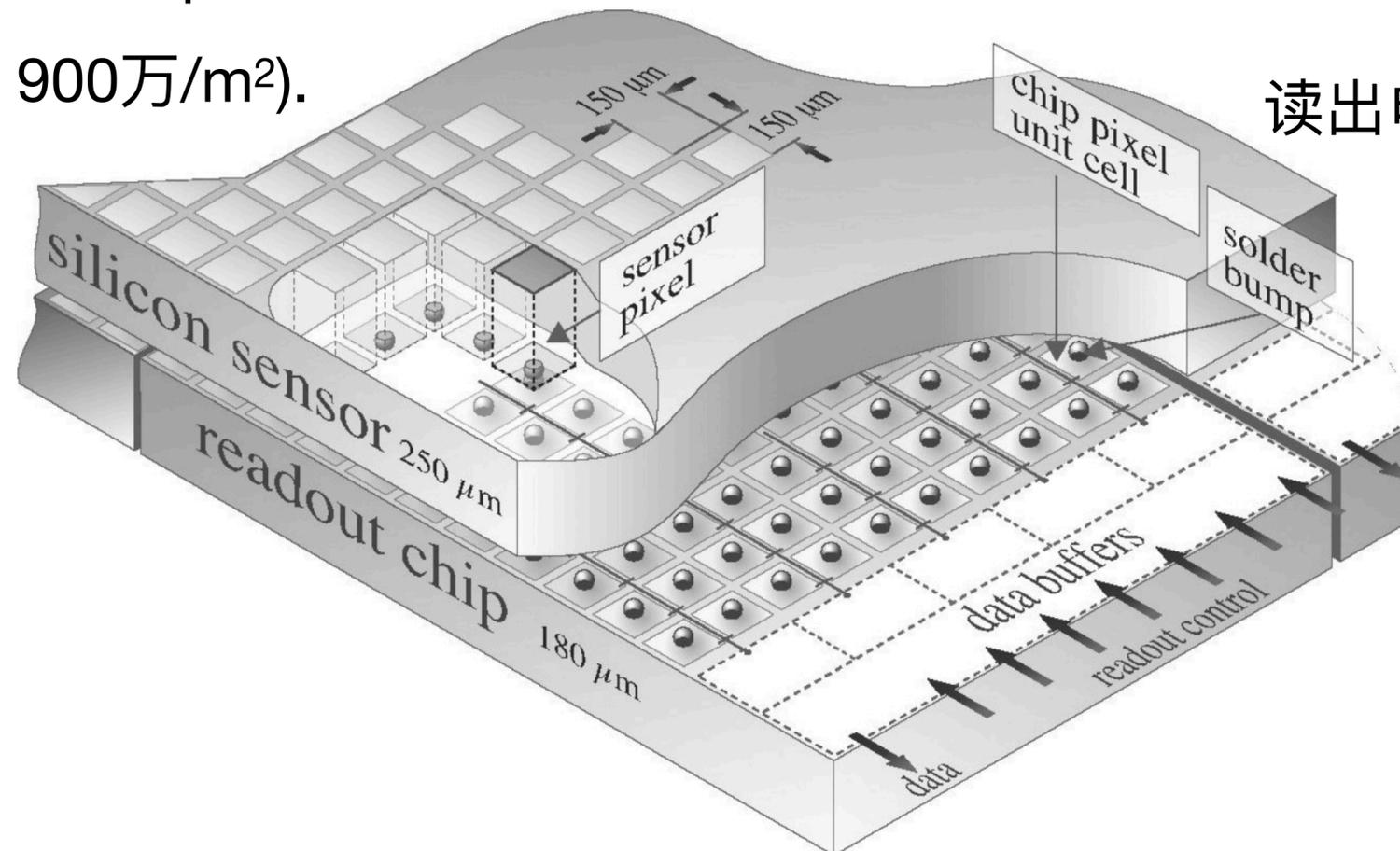


- 收集到的电信号通过读出电路放大, 数字化.
- 输出电信号的到达时间, 大小, 与像素地址.



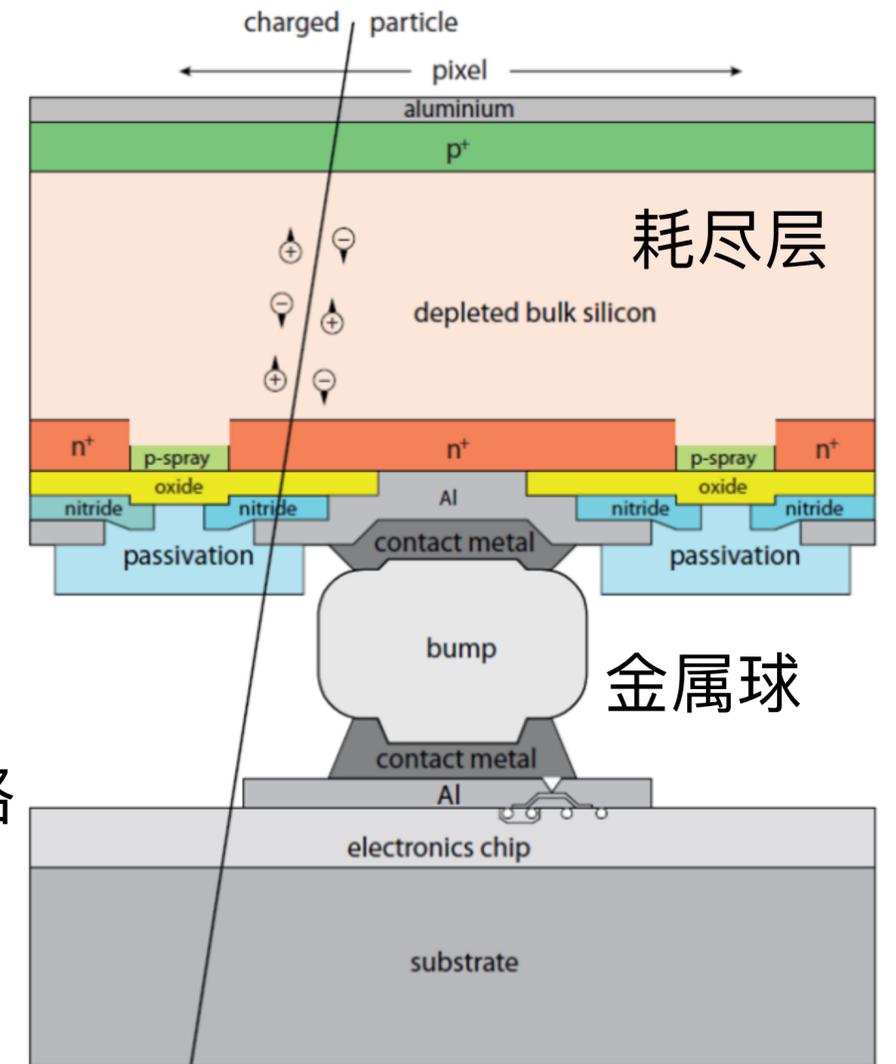
混合式像素探测器

- 硅探测器与读出电路分别在不同的硅片上 (hybrid).
- 分别使用不同技术, 使探测器与读出电路达到最佳性能:
 - 探测器使用最佳材料以提高抗辐射能力;
 - 读出电路使用小节点工艺从而提高读取速度.
- 通过金属球连接 (像素大小 $> 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$).
- 双层结构 -> 厚度 $> 300 \mu\text{m}$.
- 工艺复杂, 昂贵 (> 900 万/ m^2).



硅探测器

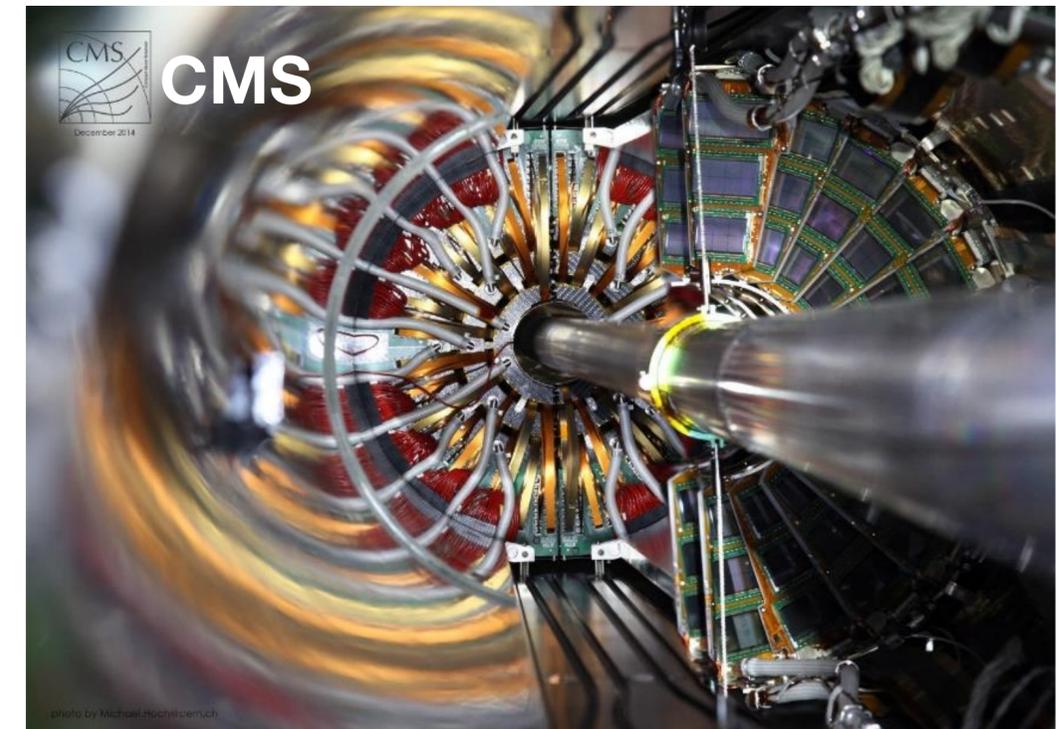
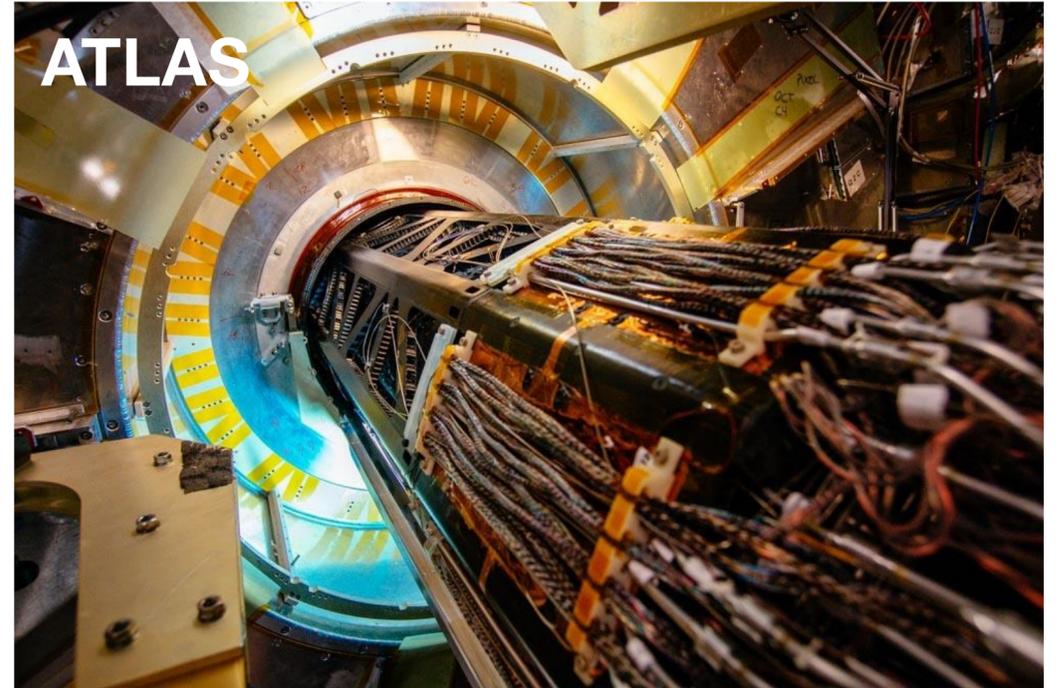
读出电路



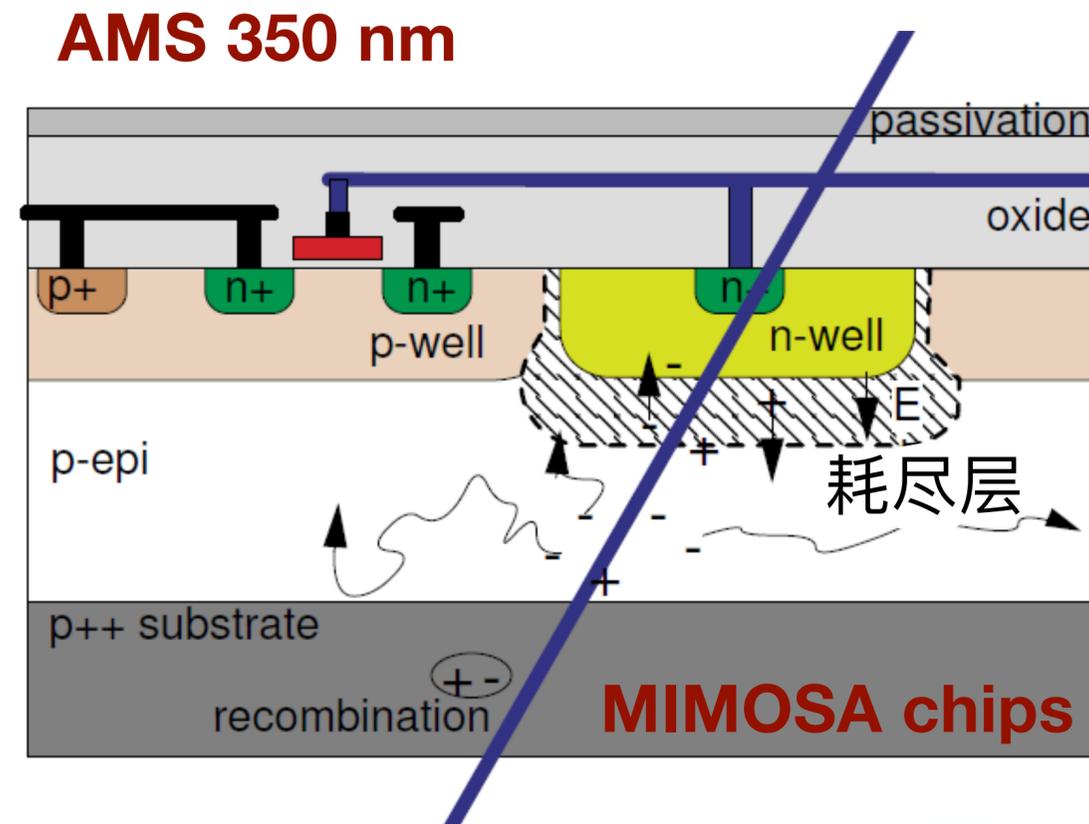
金属球

混合式像素探测器

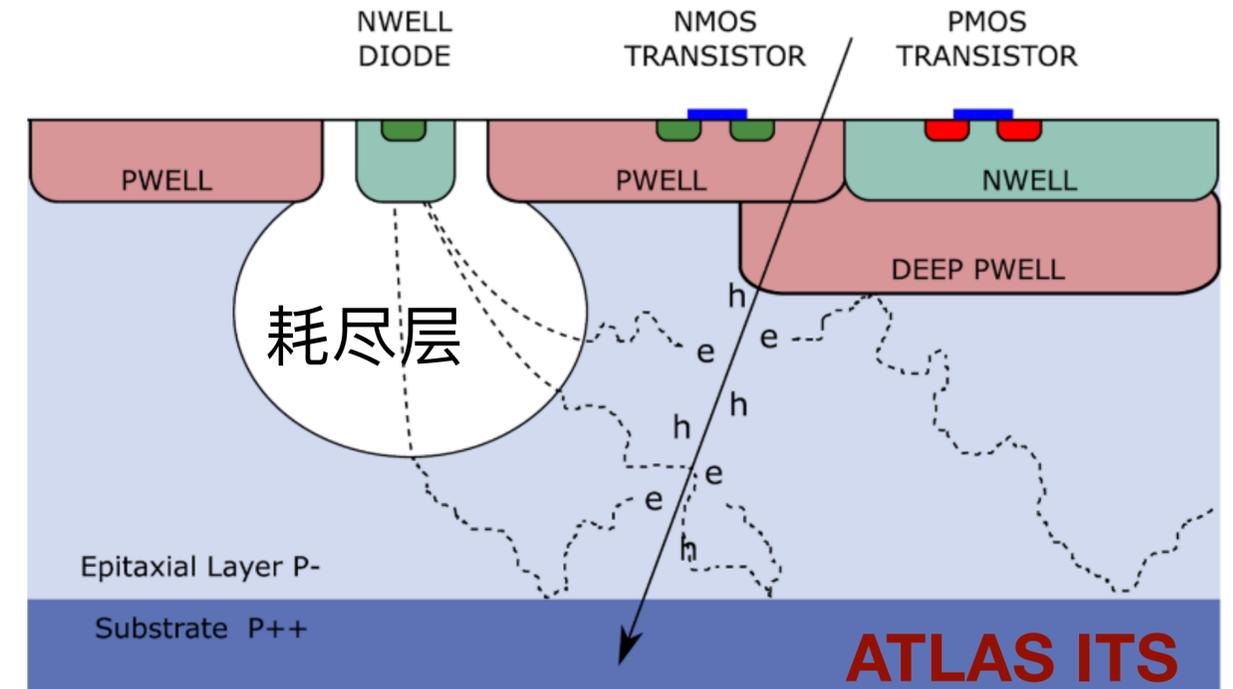
- 用于需要超高读出速度的场合.
- 被ATLAS, CMS, ALICE使用在最靠近对撞点的位置.
- 高能物理实验中面积最大的像素探测器系统 (~ 10 m²).



- 硅探测器与读出电路集成在同一块硅片上 (monolithic), 使用普通CMOS工艺.
- 单层结构 -> 厚度可以减少到50 μm .
- 无需使用金属球连接 (像素大小可达到18 $\mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$).
- 工艺更简单, 造价更低 (~ 90 万/ m^2).
- 低偏置电压($< 10 \text{ V}$) -> 有限的耗尽层深度, 有限的抗辐射能力($10^{13} \text{ 1MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$).
- 用于需要高空间精度的实验.

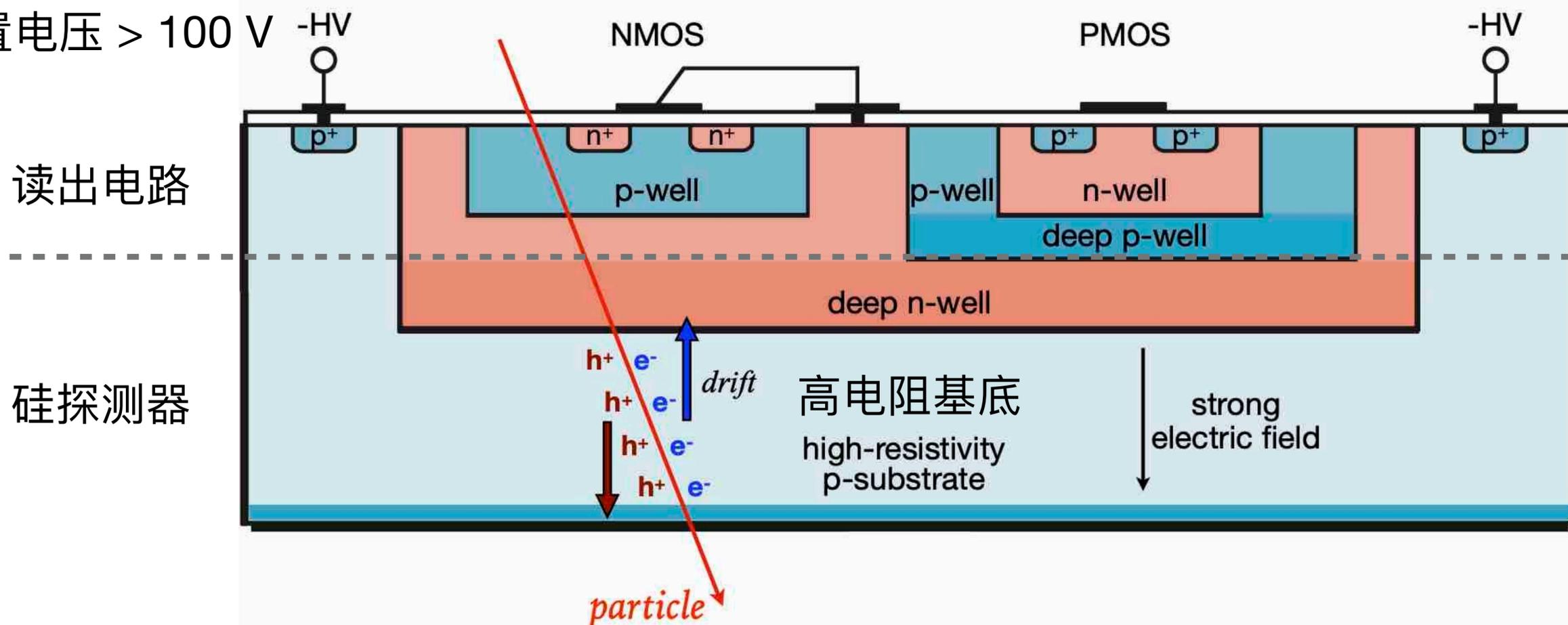


TowerJazz 180 nm



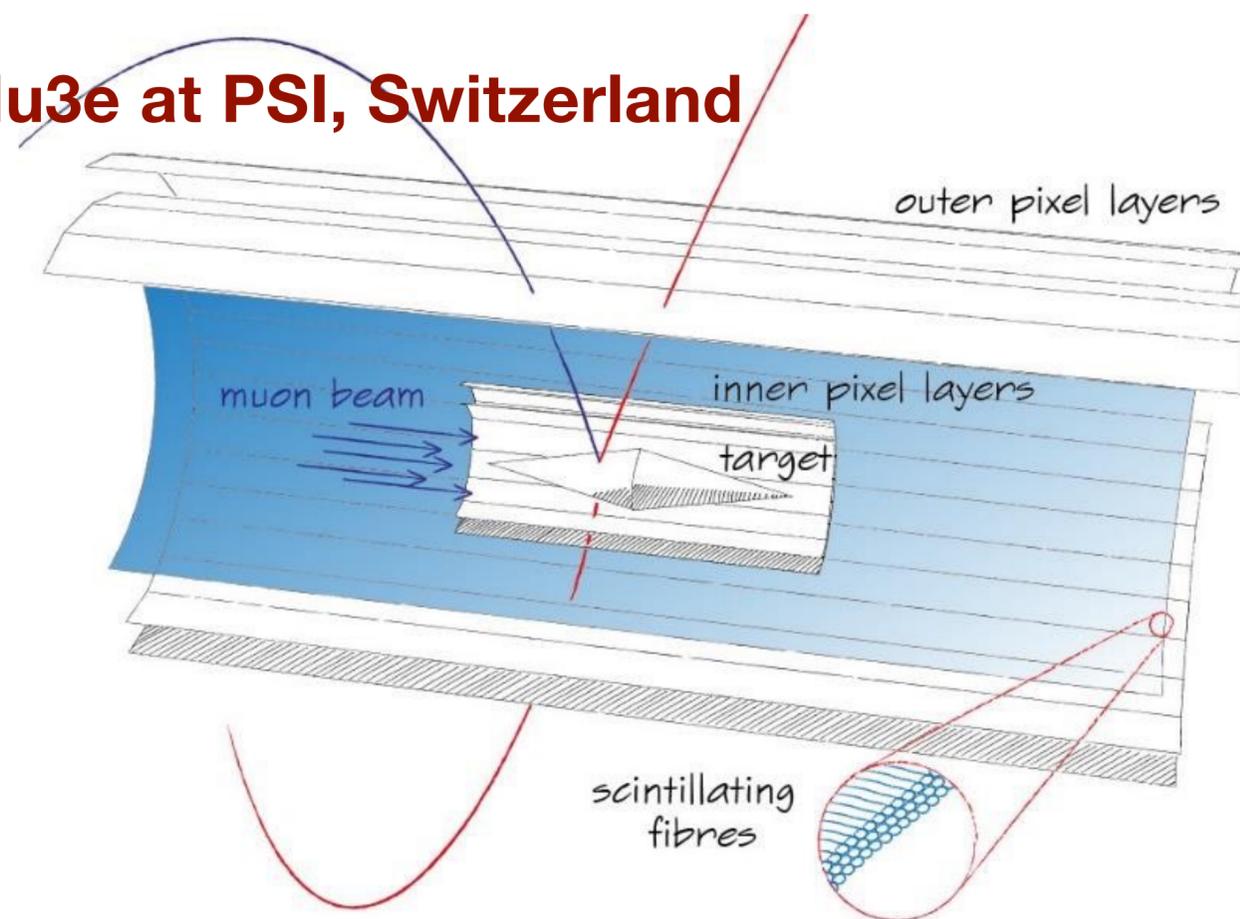
- 在单片像素探测器的基础上, 使用高压CMOS(HV-CMOS)工艺, 和高电阻(HR)的硅晶圆作为基底.
- 深井(deep n-well)既作为电子收集电极, 也把低电压的读出电路与高电压的基底隔开.
- 强化耗尽层 ($W \propto \sqrt{V_{bias} \cdot \rho}$), 基底可以完全耗尽 -> 更好的抗辐射性能 ($> 10^{15} \text{ 1MeV n}_{eq}/\text{cm}^2$).
- 源于汽车工业 -> 可以以较低成本大量制造.
- 结合了混合式与单片式探测器的优点, 下一代的硅像素探测器.

高偏置电压 $> 100 \text{ V}$ -HV

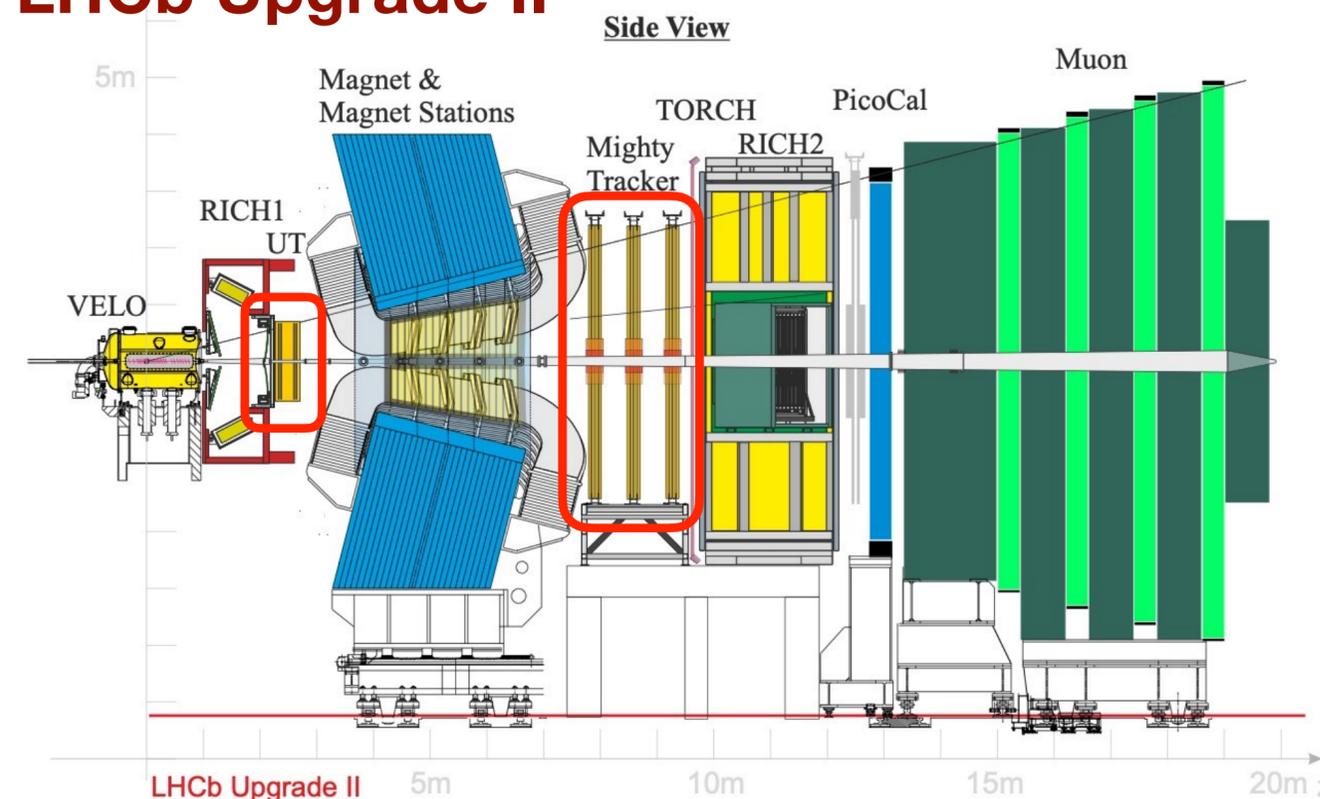


- 第一次被应用在瑞士Paul Scherrer Institute (PSI) 的Mu3e实验中 ($\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$).
 - 低探测器质量: 探测器厚度 $50 \mu\text{m}$
 - 高空间精度: 像素面积 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$
- LHCb Upgrade II中的Mighty Tracker与UP已选择使用HV-CMOS作为它们的像素探测器技术。
 - 高抗辐射性能: Mighty Tracker ($3 \times 10^{14} \text{ 1MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$), UP ($3 \times 10^{15} \text{ 1MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$).

Mu3e at PSI, Switzerland



LHCb Upgrade II

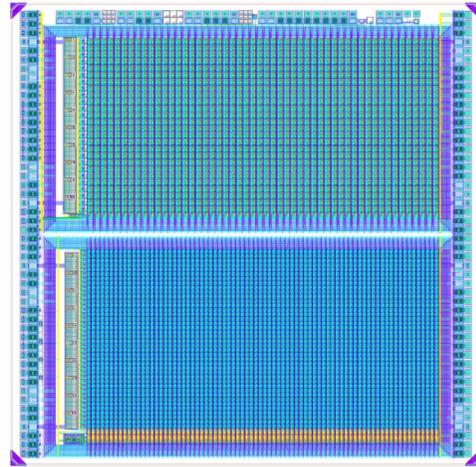


RD50-MPW与UKRI-MPW

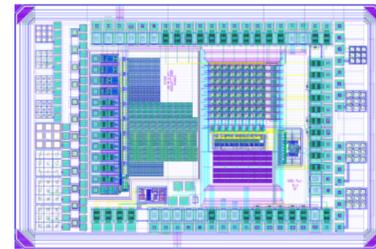
- CERN-RD50: 致力于研发用于下一代高亮度对撞实验的抗辐射探测器
 - High Luminosity-LHC (HL-LHC): 10^{16} 1MeV n_{eq}/cm^2
 - Future Circular Collider (FCC-hh): 7×10^{17} 1MeV n_{eq}/cm^2



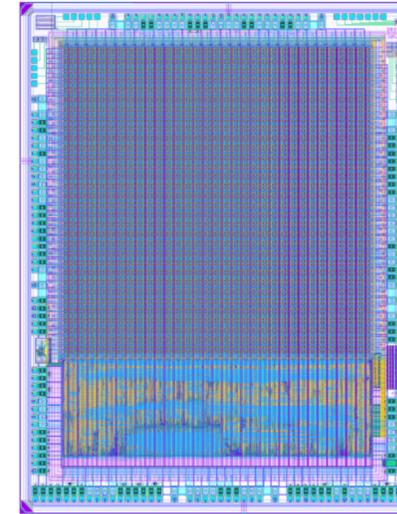
RD50-MPW1



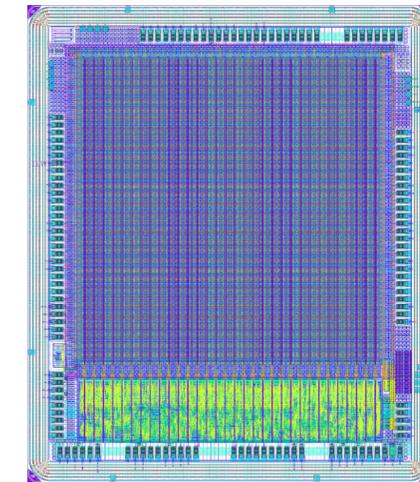
RD50-MPW2



RD50-MPW3



RD50-MPW4



2017

2018

2019

2020

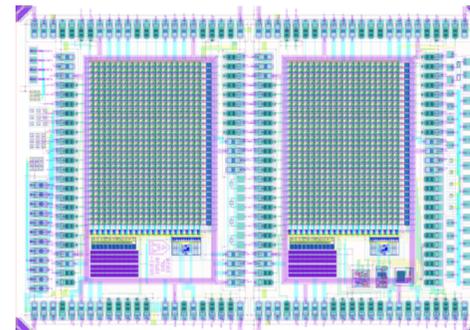
2021

2022

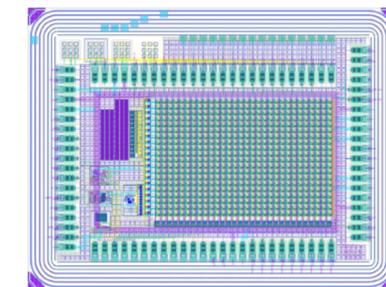
2023

2024

UKRI-MPW0

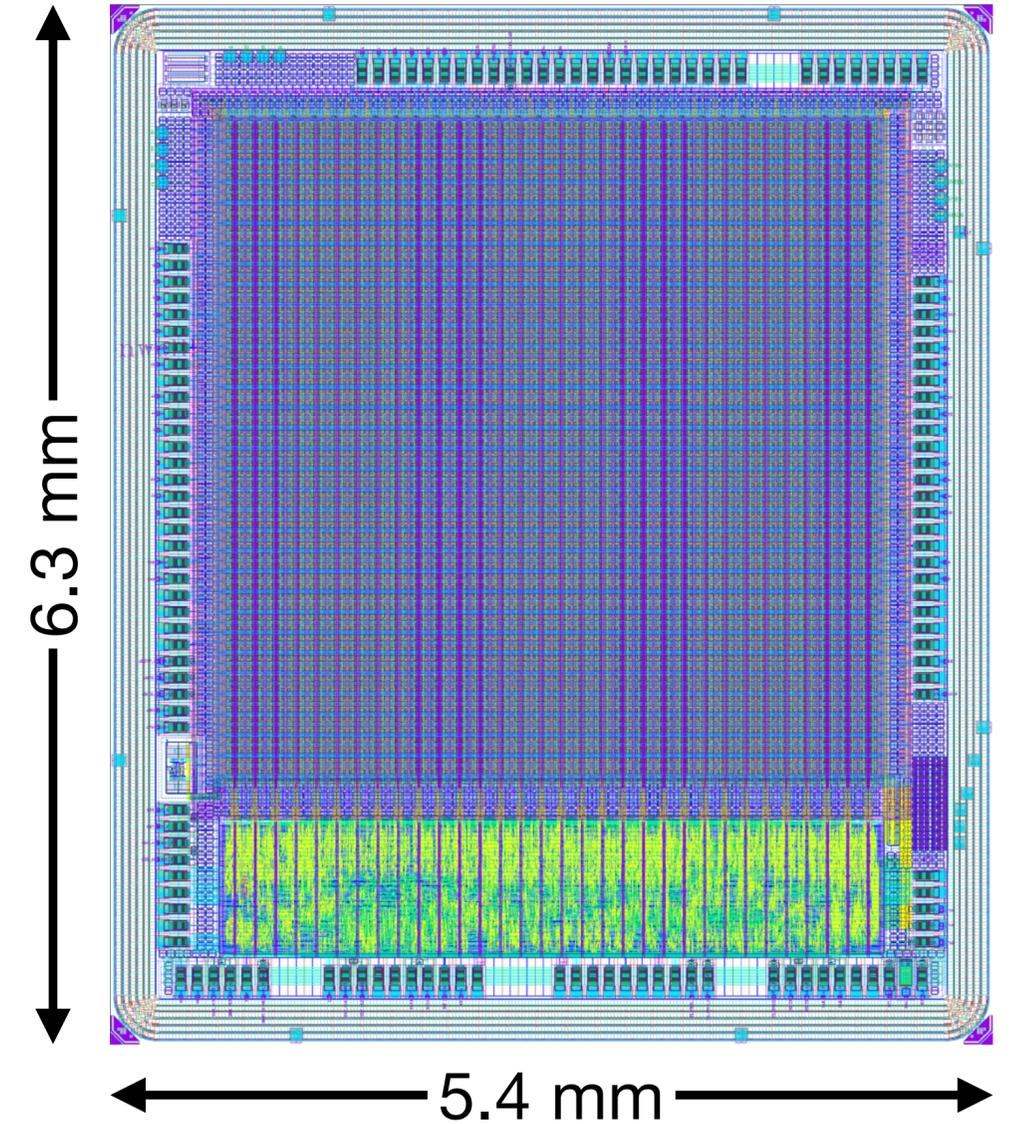
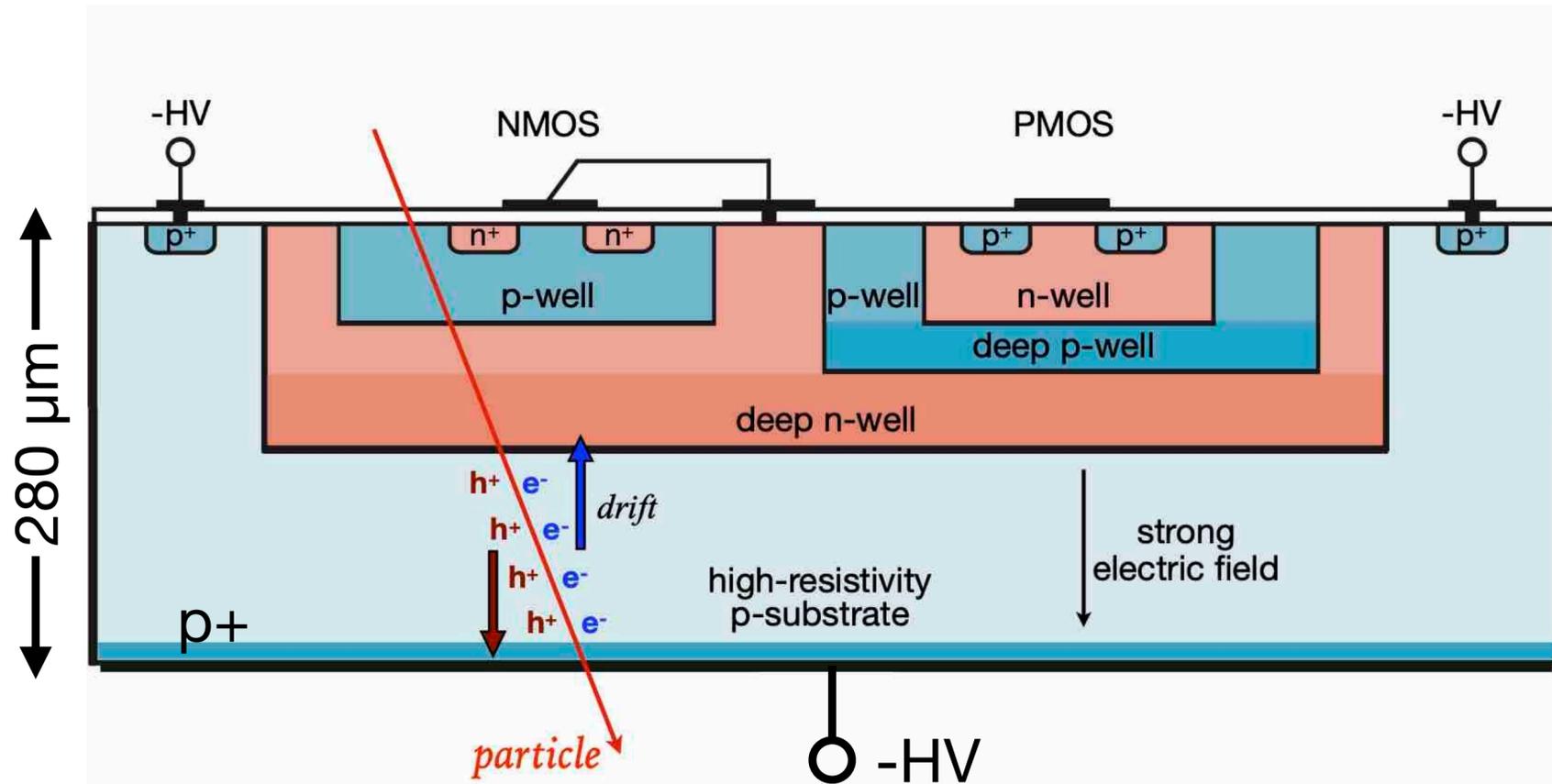


UKRI-MPW1



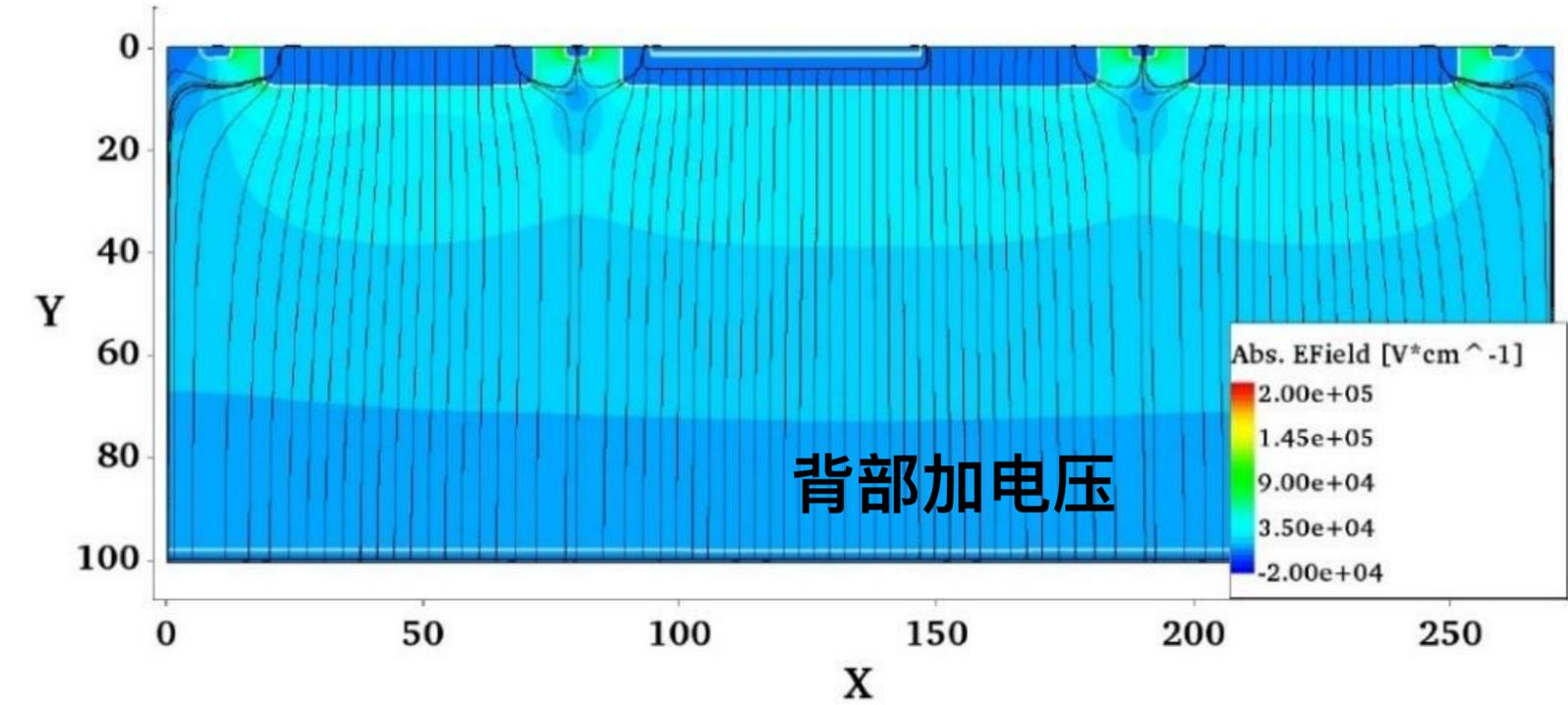
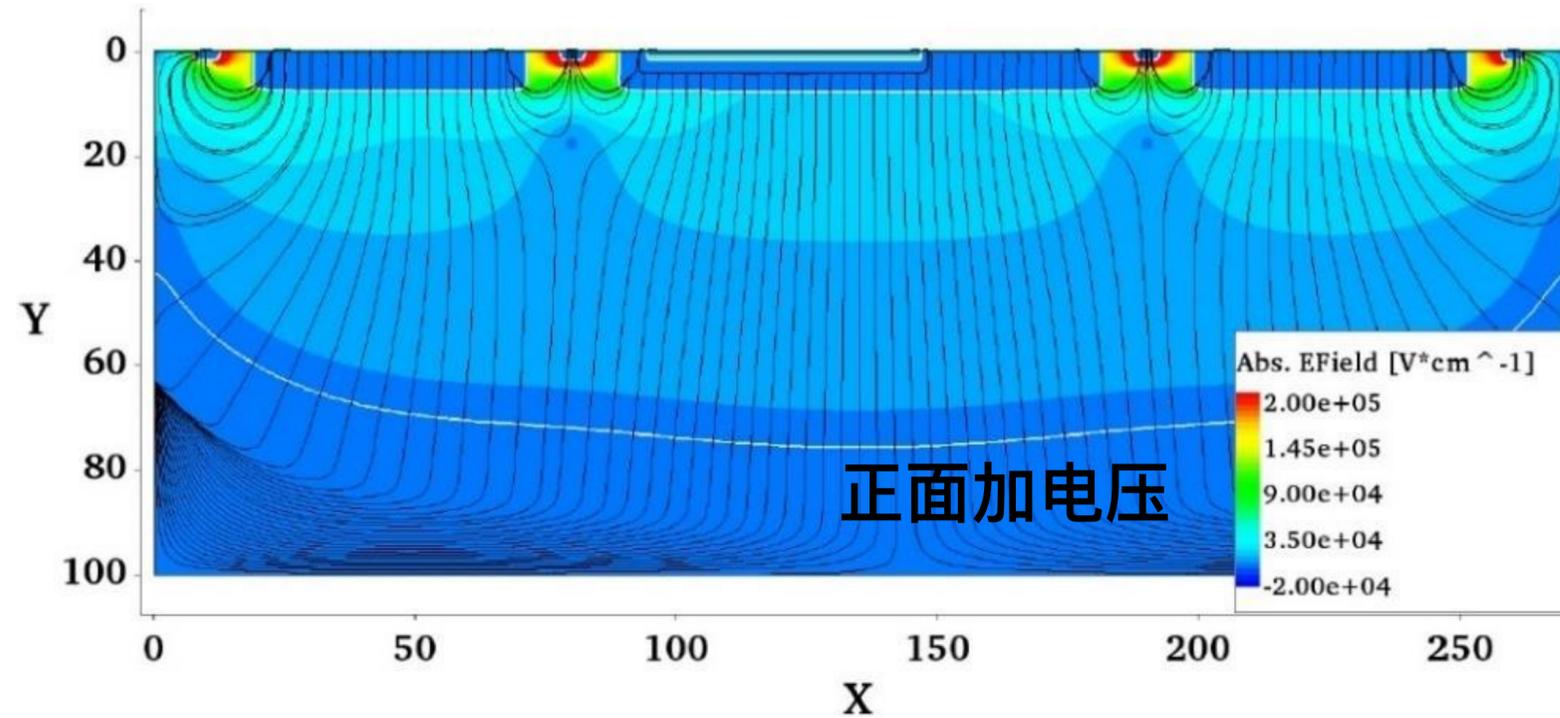
LFoundry 150 nm HV-CMOS

- LFoundry代工厂的150 nm HV-CMOS工艺.
- 制造了三块 $3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻硅晶圆, 并打磨减薄到 $280 \mu\text{m}$:
 - 一块晶圆上的探测器使用传统方法, 从正面附加高电压;
 - 另两块进行了背部处理(p+掺杂), 实现从背部加高压.

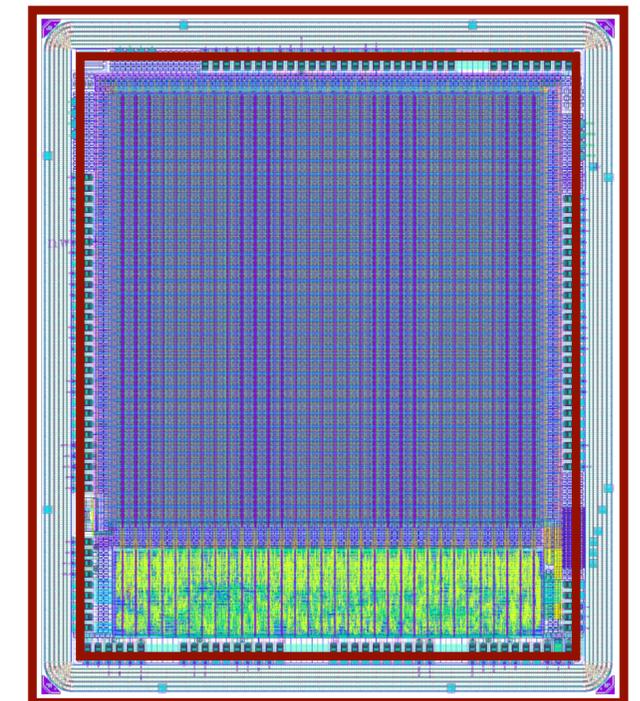
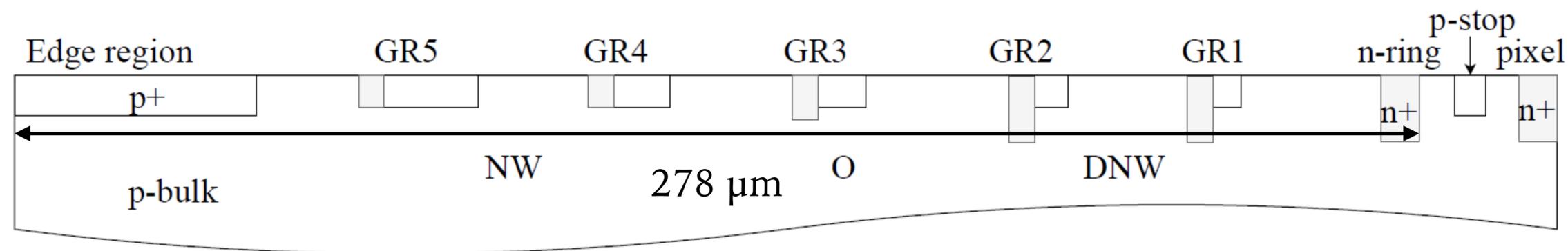


RD50-MPW4 - 改进的加压方式

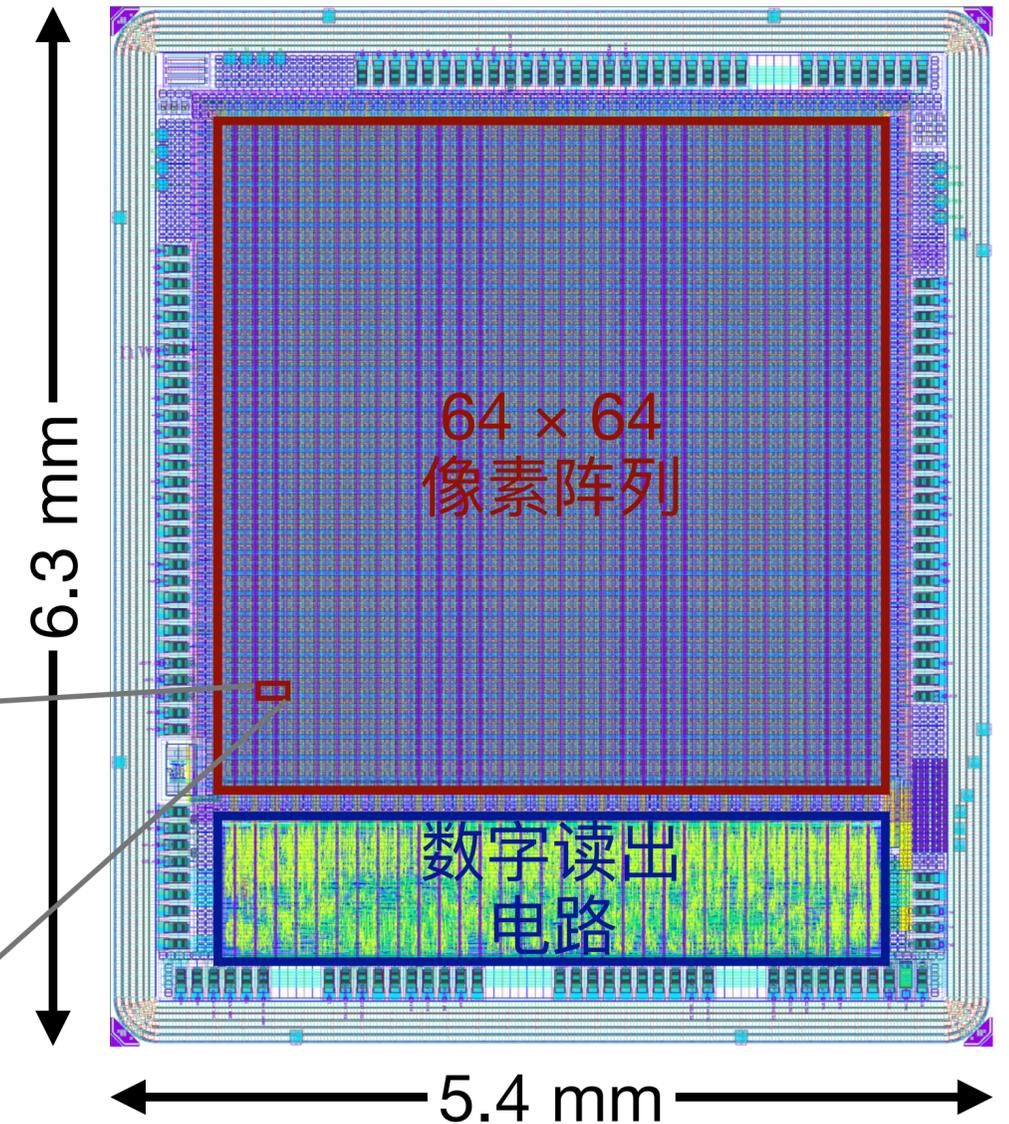
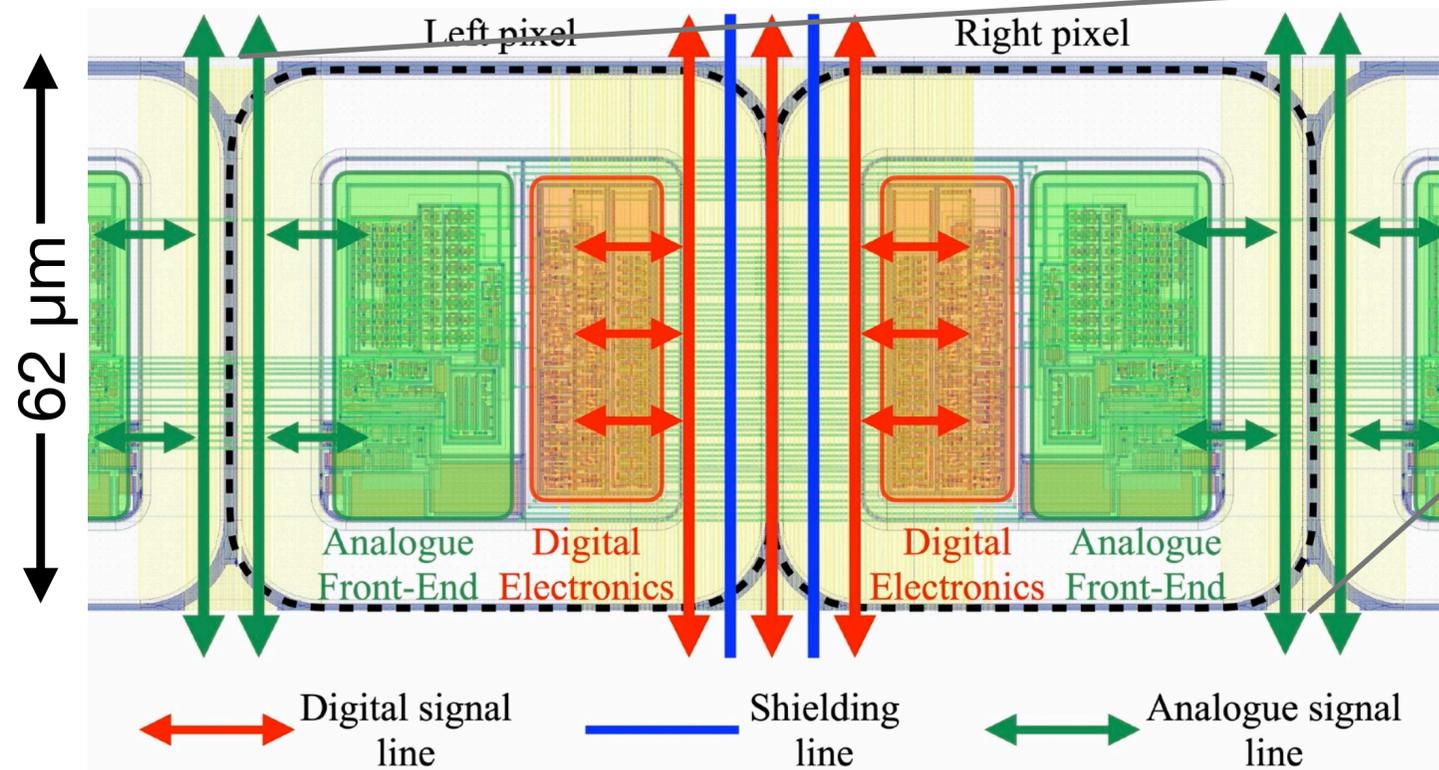
- 根据TCAD仿真, 通过背部加压得到更整齐的电场分布与强度. 电场线和电场强度:



- 采用优化的保护环, 多个P+N结构.

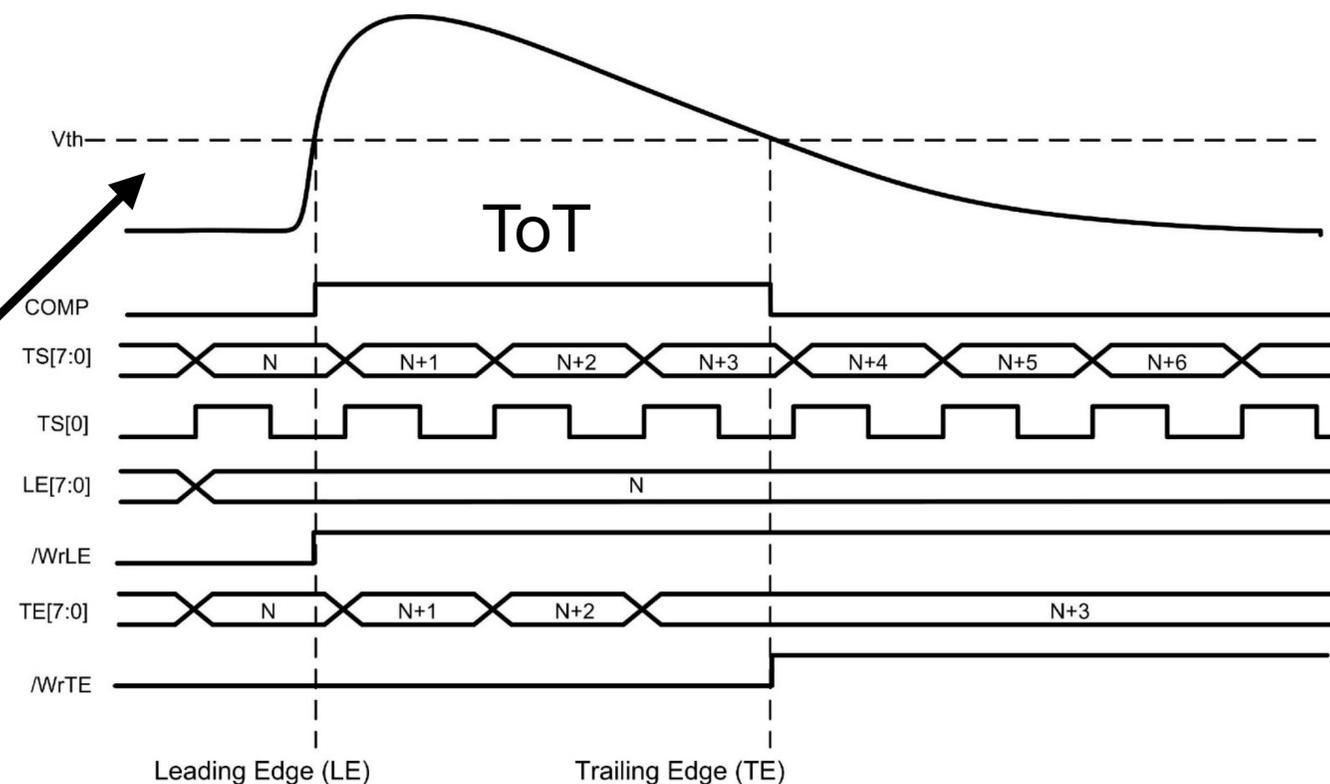


- 主要由一个64×64的像素阵列与数字读出电路构成:
 - 像素阵列使用与FE-I3读出芯片类似的结构,
 - 采用双列结构(两列像素公用一组信号线)以减轻排线拥挤并减少数模信号之间的串扰噪声.
 - 数字读出电路使用I2C协议完成配置, 通过一个LVDS串联借口进行数据读出(640Mbit/s).
- 单个像素大小为62 μm × 62 μm, 同时包含了模拟前端与数字电路.



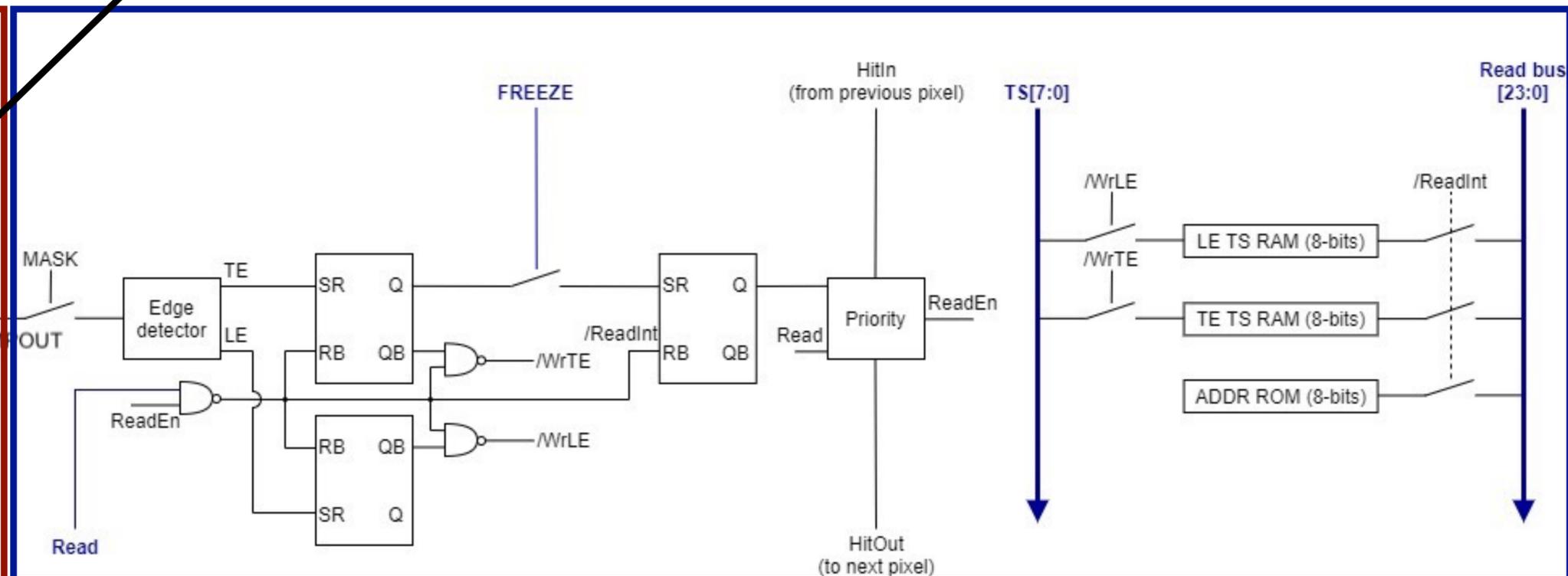
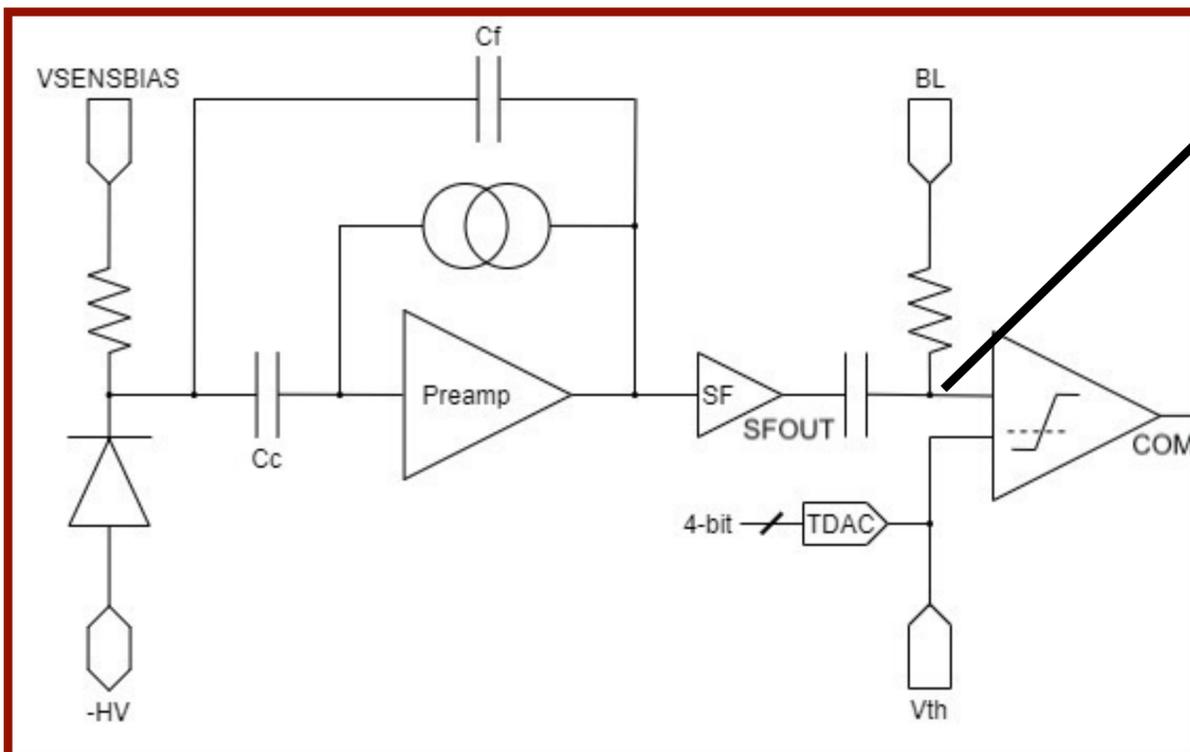
RD50-MPW4 - 像素内电路

- 接收40 MHz 8-bit时钟信号.
- 读出8-bit上升沿时间戳, 8-bit下降沿时间戳, 8-bit像素地址.
- 比较器的阈值可以通过4-bit的DAC调节, 用以平衡像素间的差异.

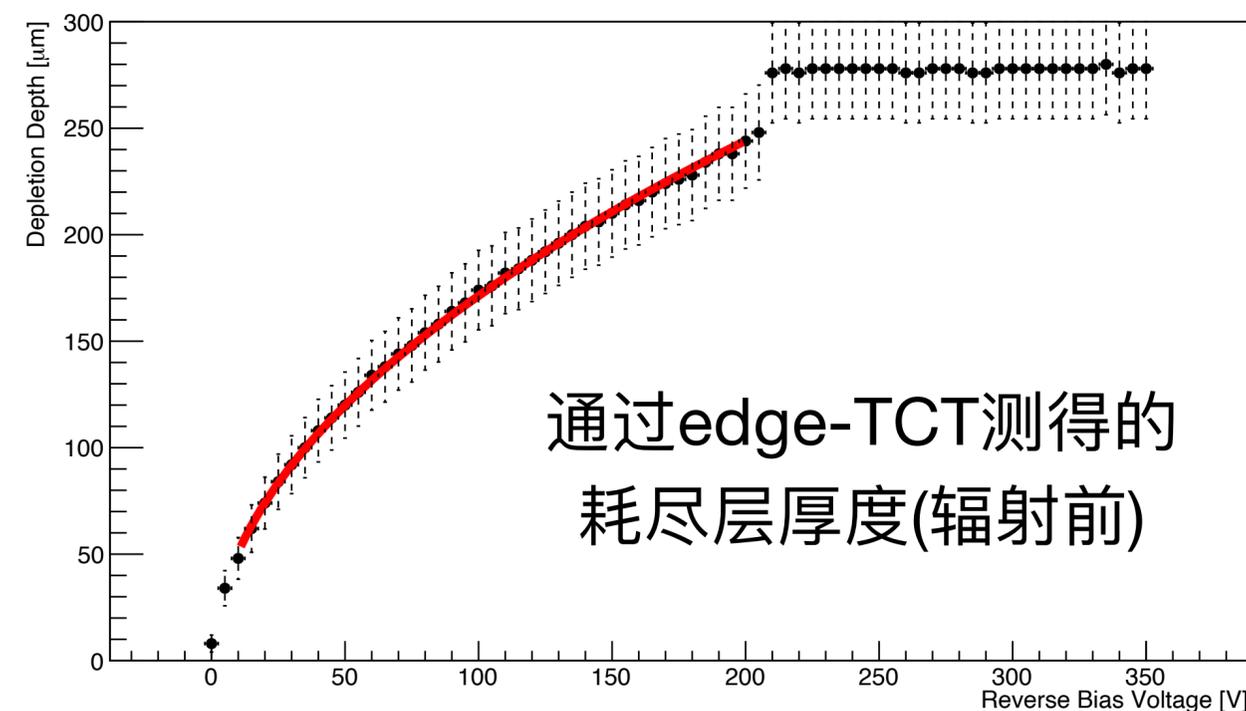
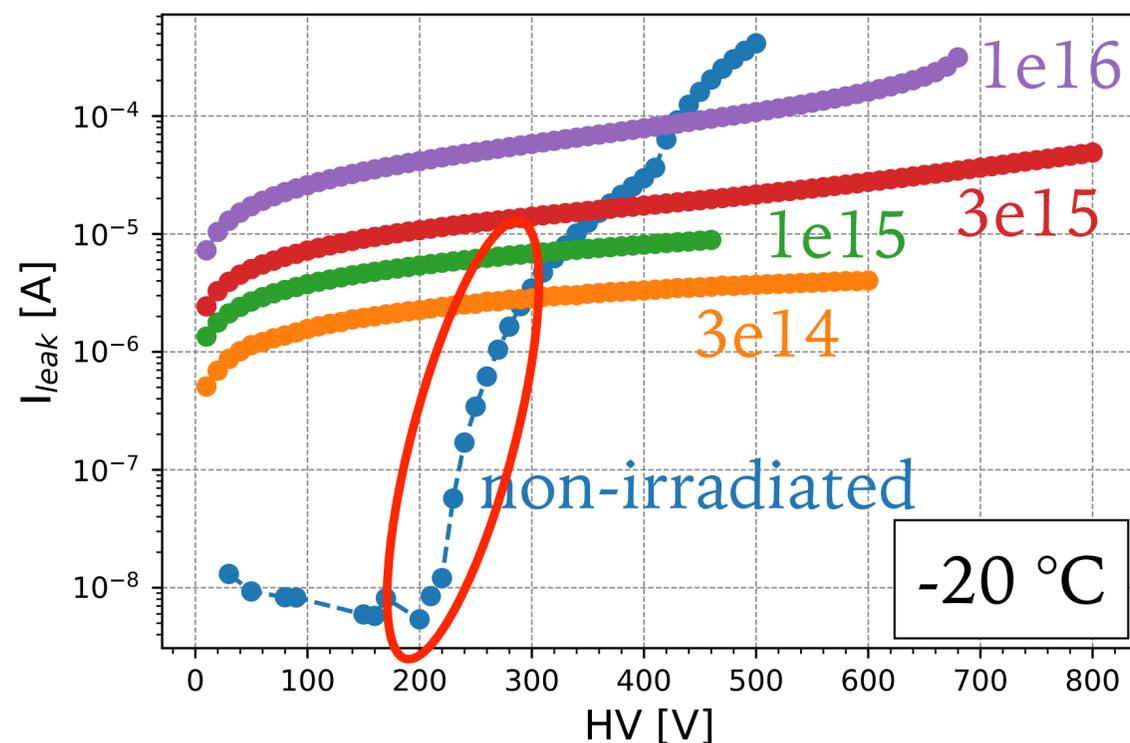


模拟前端

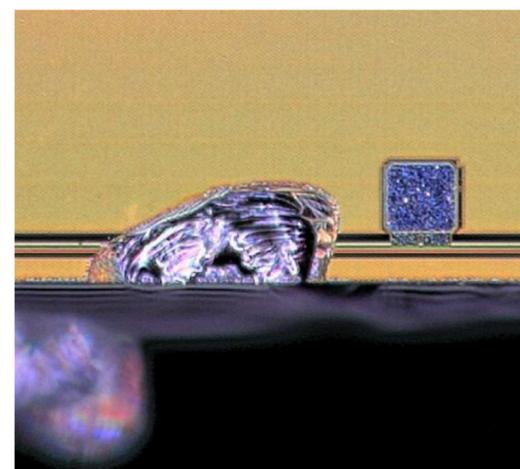
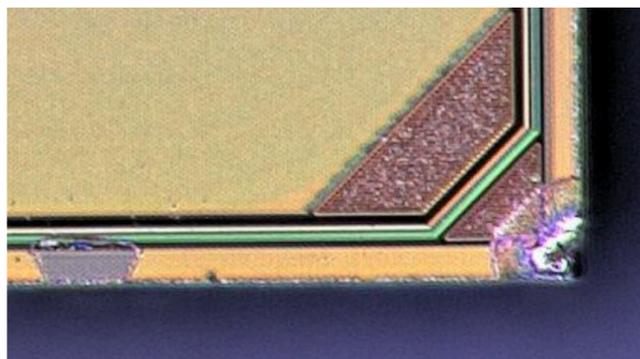
数字读出



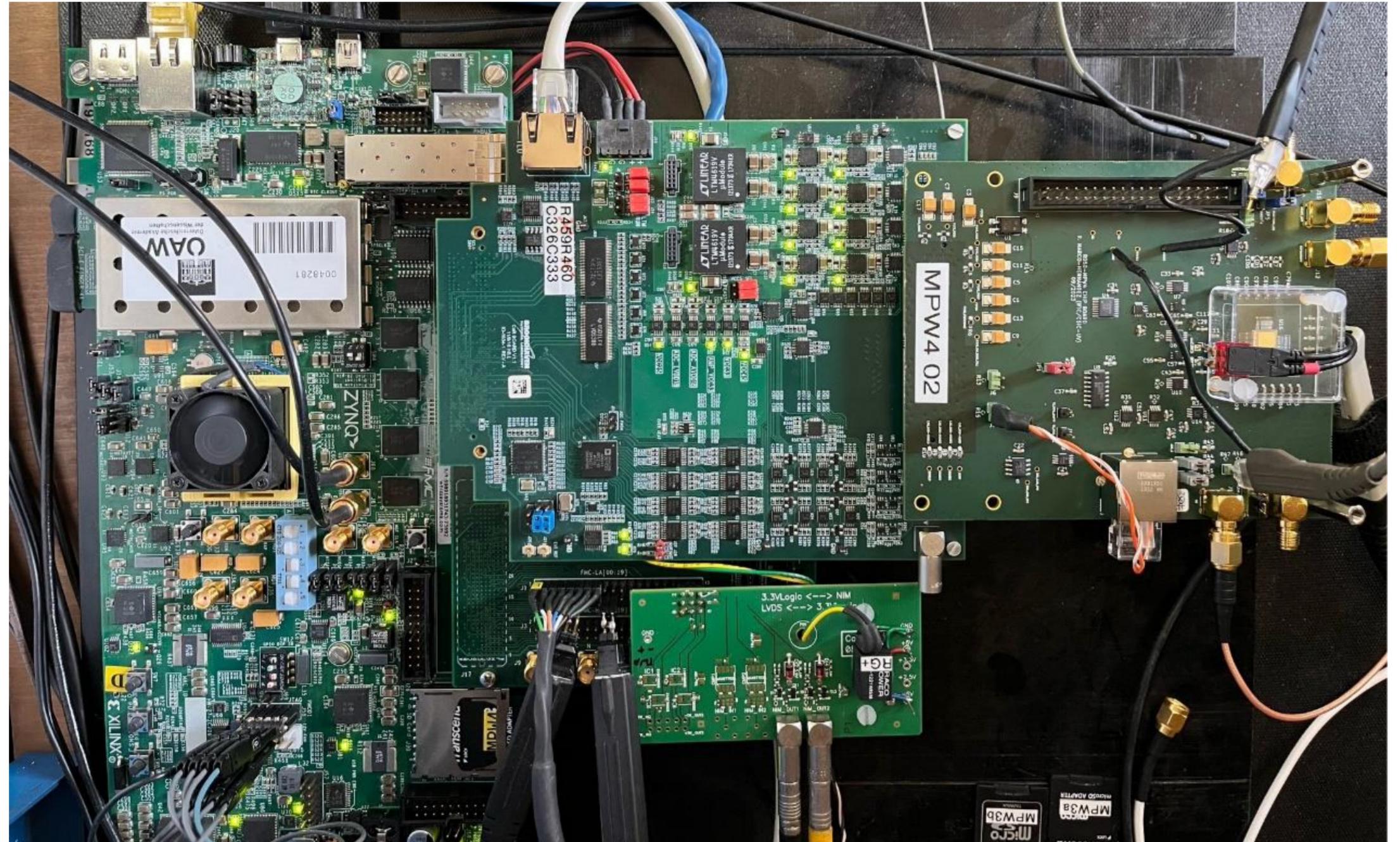
- 在Ljubljana反应堆用中子辐射到不同剂量: $1e14$, $3e14$, $1e15$, $3e15$, $1e16$ n_{eq}/cm^2 .



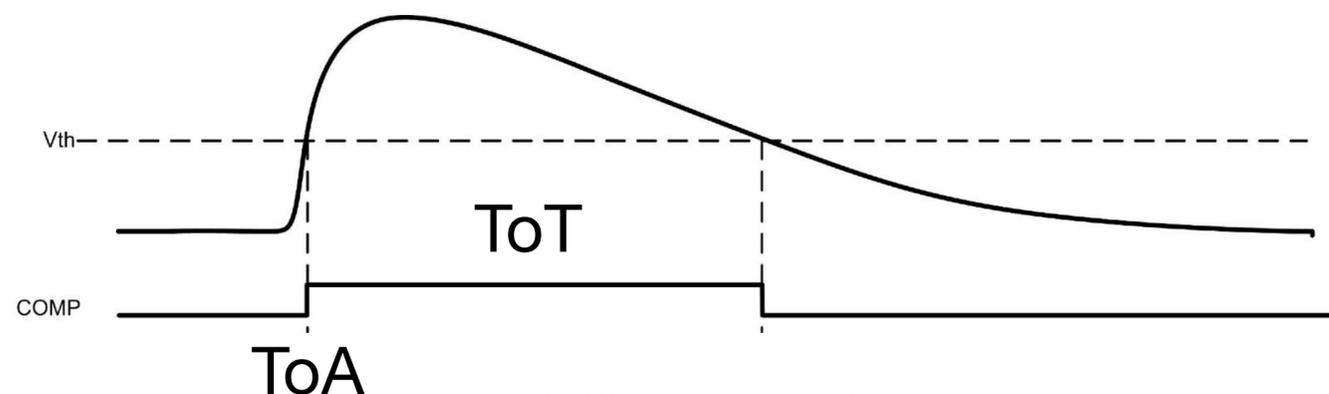
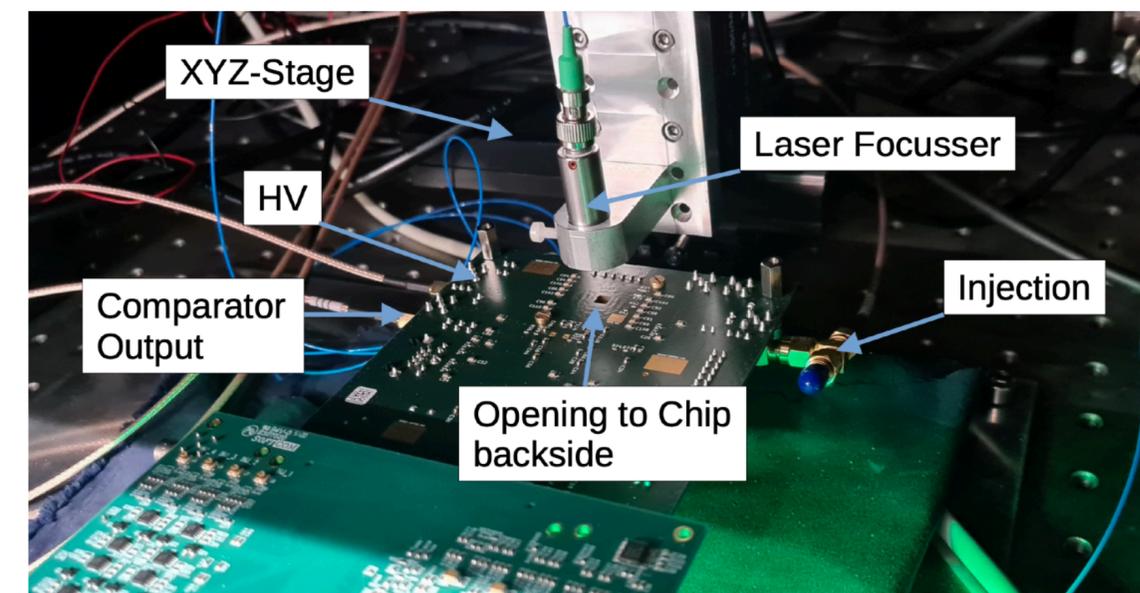
- 发现在切割过程中产生的损伤.



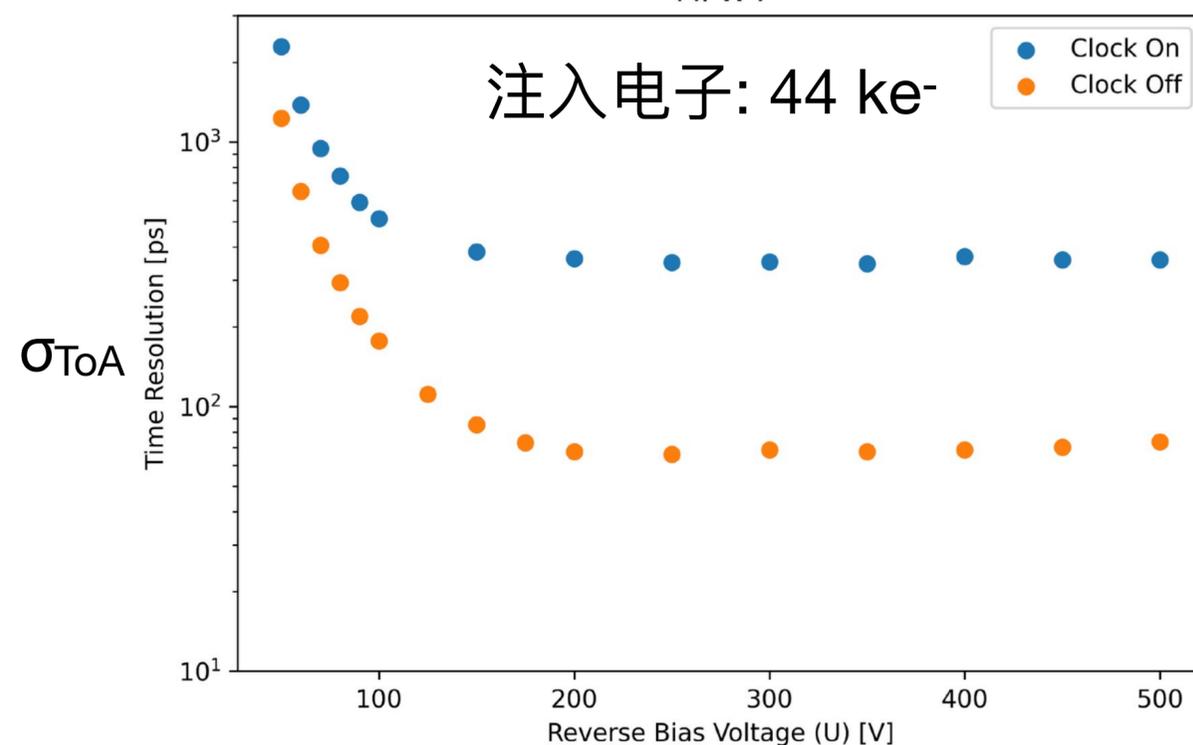
- 基于Caribou系统的Control and Readout (CaR) Board.
- Xilinx Zynq-7000 FPGA.
- 定制的探测器载板.



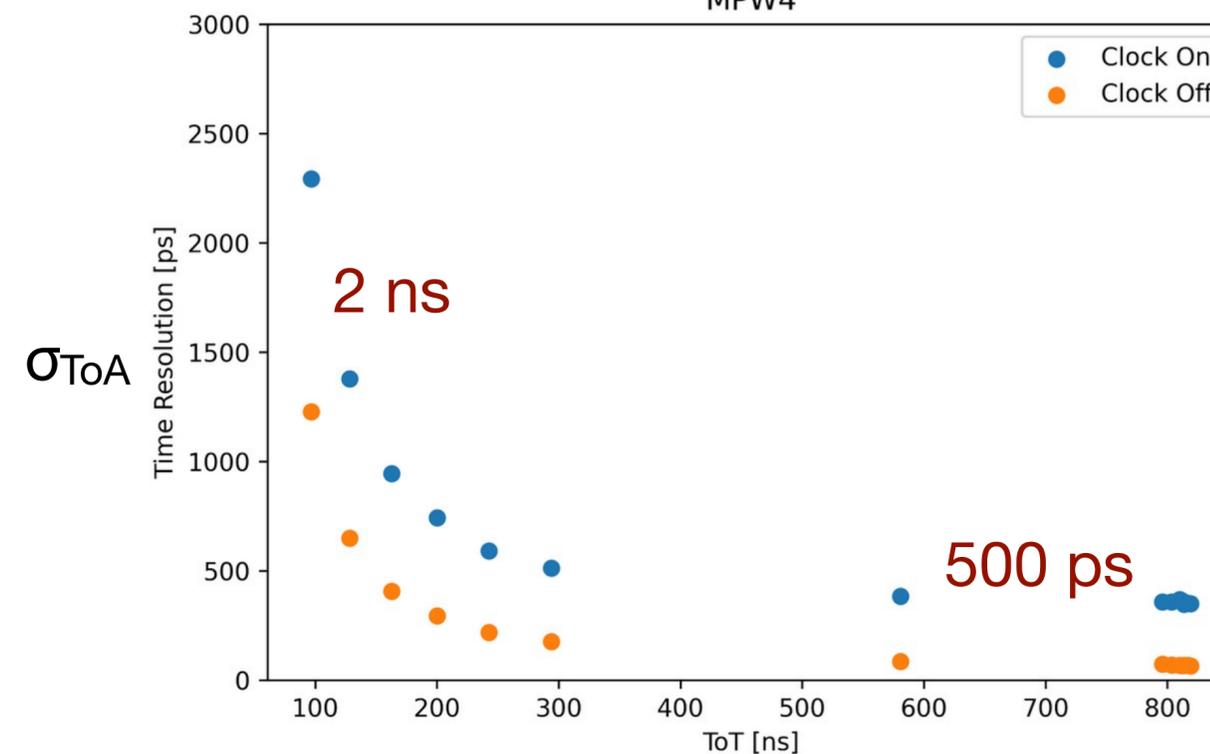
- 使用红外激光, 从背部向未经过处理的探测器耗尽层注入定量的电子, 通过ToT测量注入的电子量.
- 多次注入, 测量比较器上升沿到达时间(ToA)的不确定性 σ_{ToA} .



ToT at different Reverse Bias
MPW4

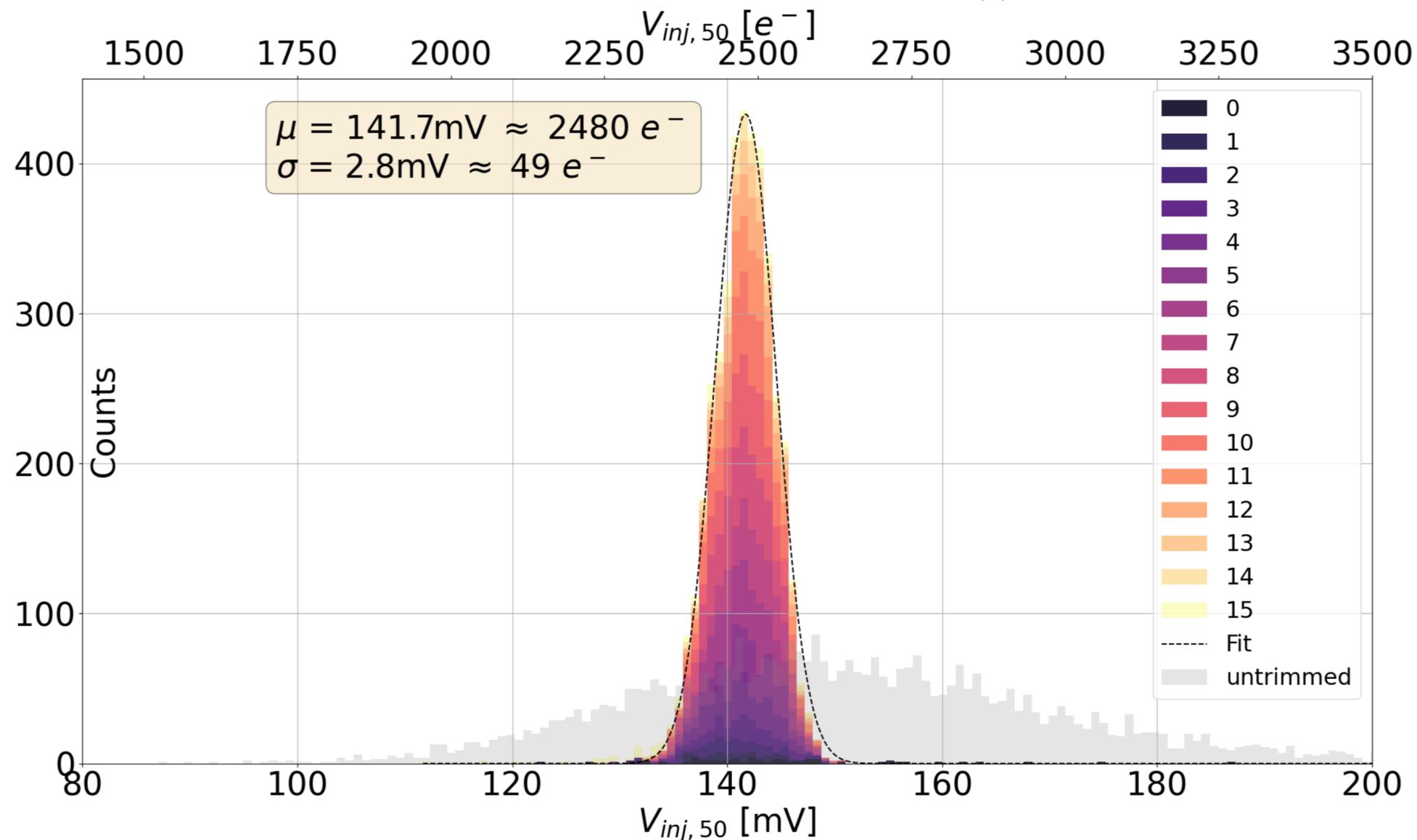
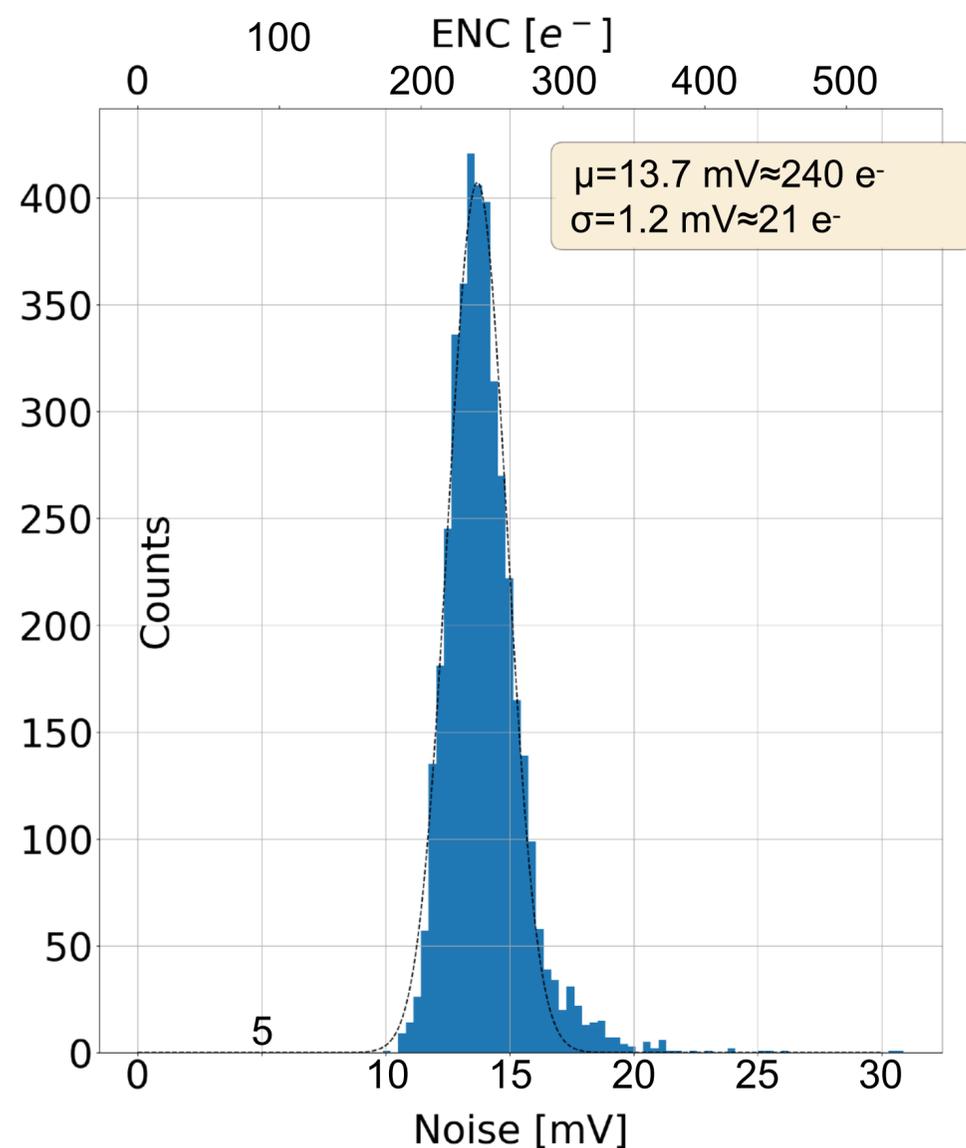
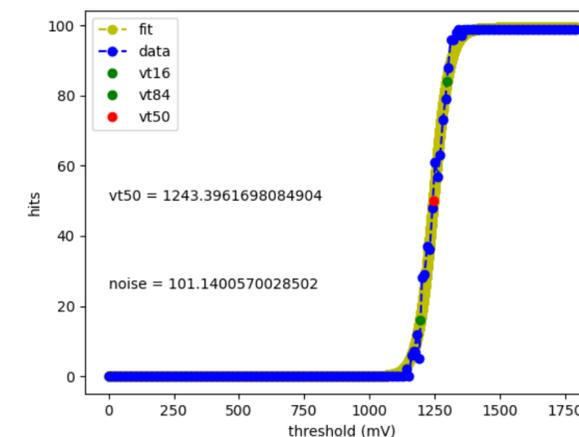


Time Resolution at ToT
MPW4



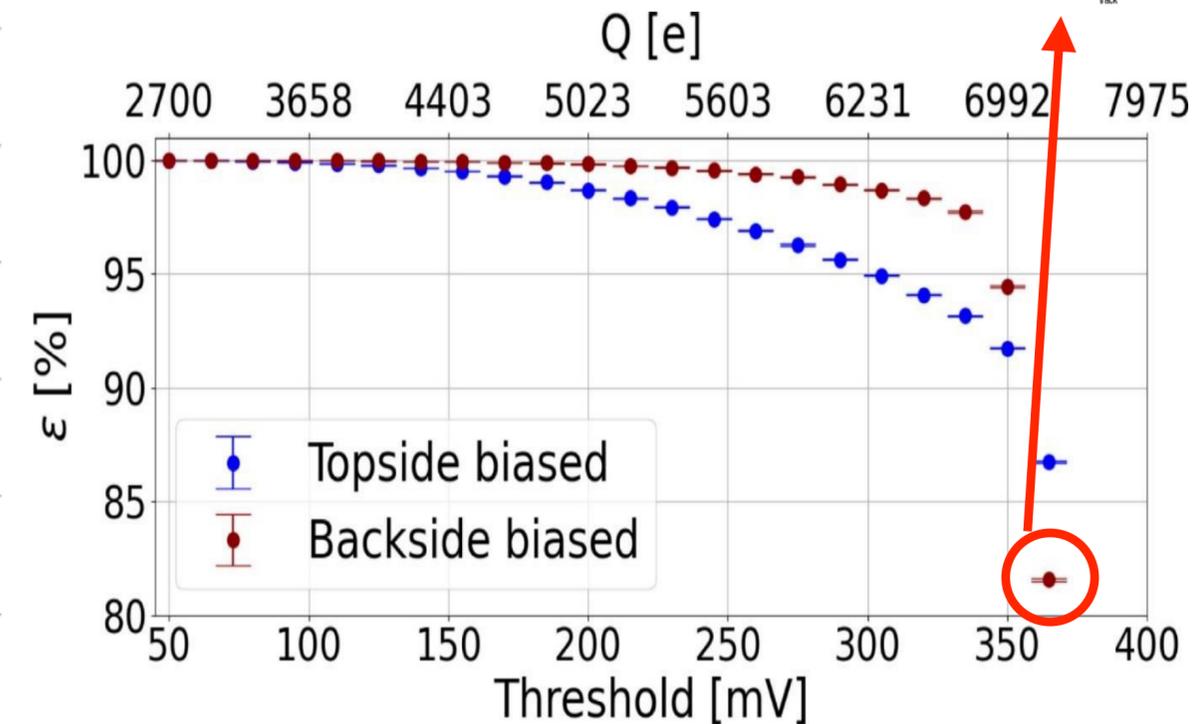
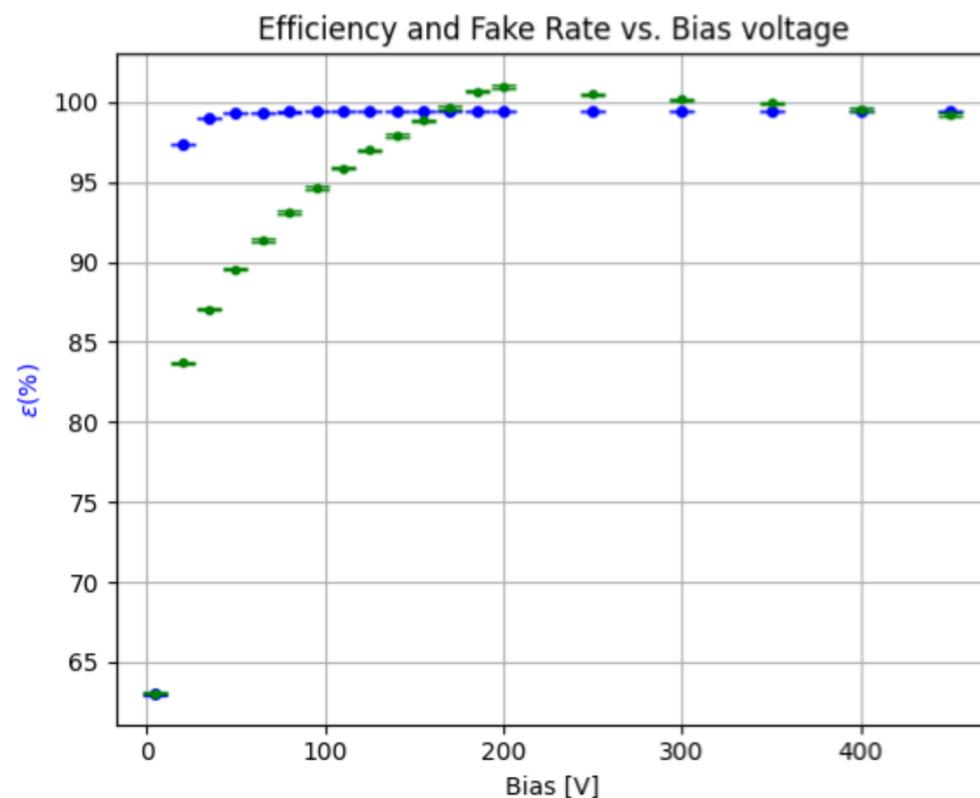
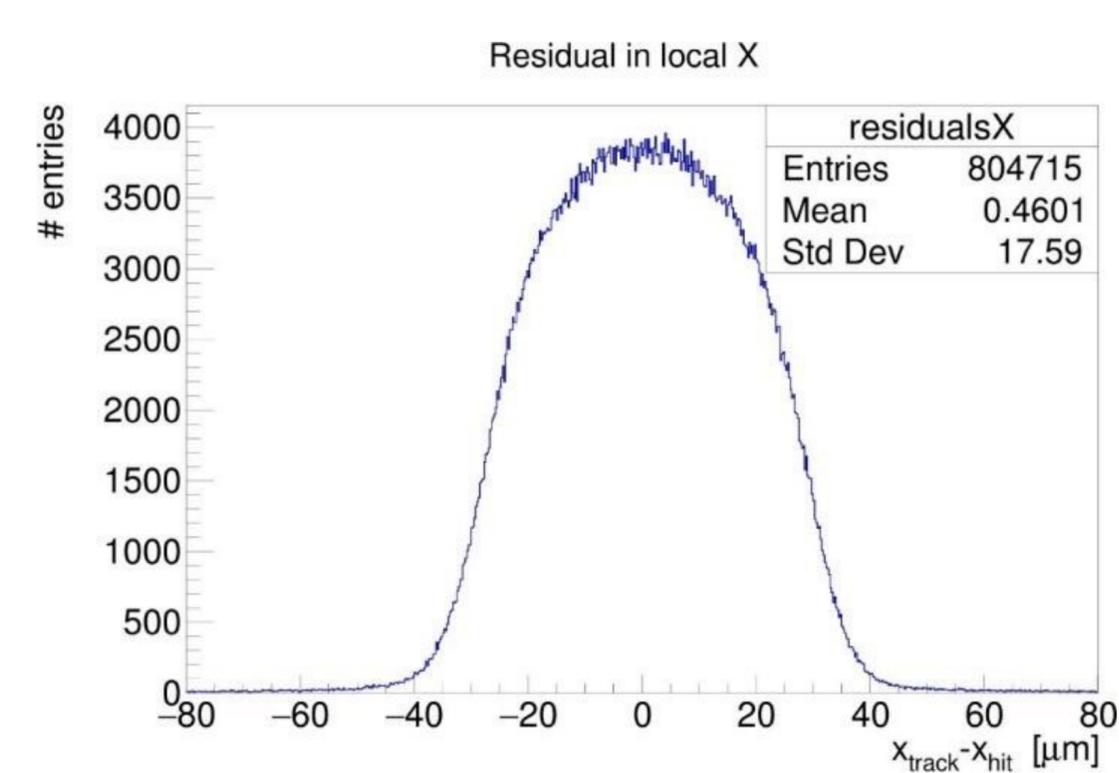
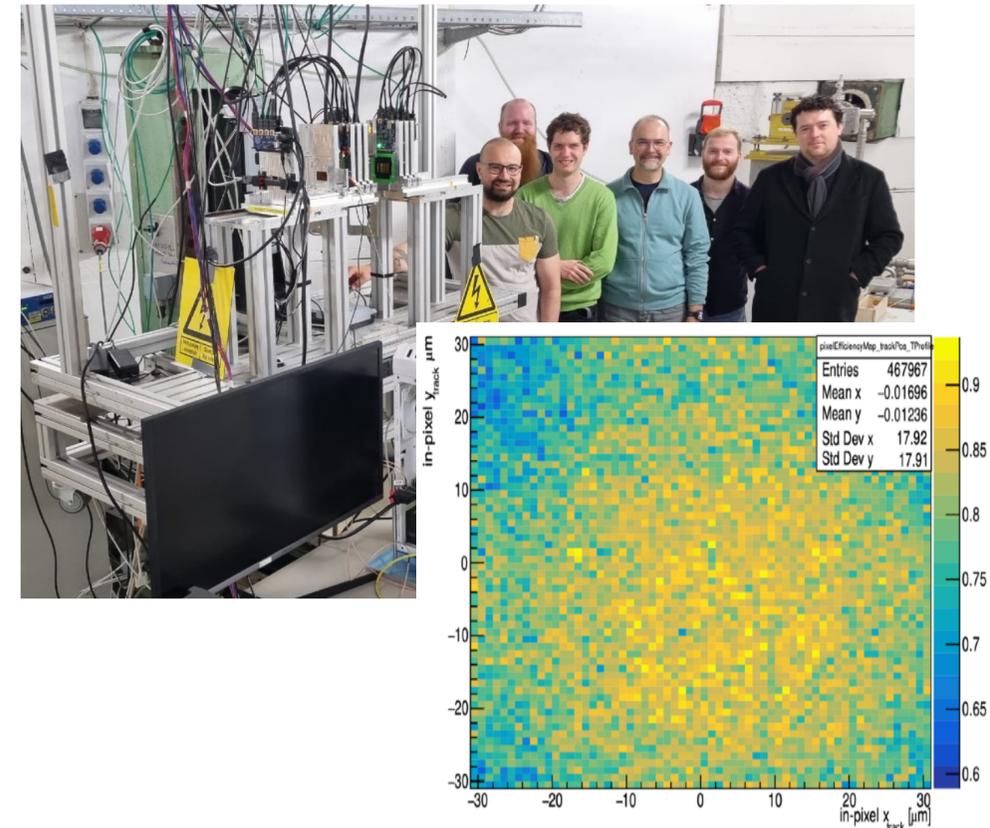
S曲线测量

- 通过向像素内的注入电容输送电压脉冲, 注入定量的电子.
- 每个注入电子量, 发送100次.
- 记录不同量的注入电子, 像素探测到的个数 -> 测量噪声, 比较器阈值.



束流测试 I

- 2024年4月, 德国汉堡DESY, 4.2 GeV 电子束, 测试未经辐射的探测器.
- Trigger: 2 scintillators via AIDA2020-TLU; Telescope: Adenium (6 Alpidic planes); Analysis: Corryvreckan.
- 空间分辨率 $17.59 \mu\text{m}$, 接近预期值($62 \mu\text{m} / \sqrt{12} \approx 17.9 \mu\text{m}$).
- 当高压大于50 V时, 探测有效率 $> 99.99\%$.
- 探测有效率在阈值电压大于200 mV (5000 e⁻)时开始变小.
- 背部加压带来了更好的电场分布 -> 更高的有效率.



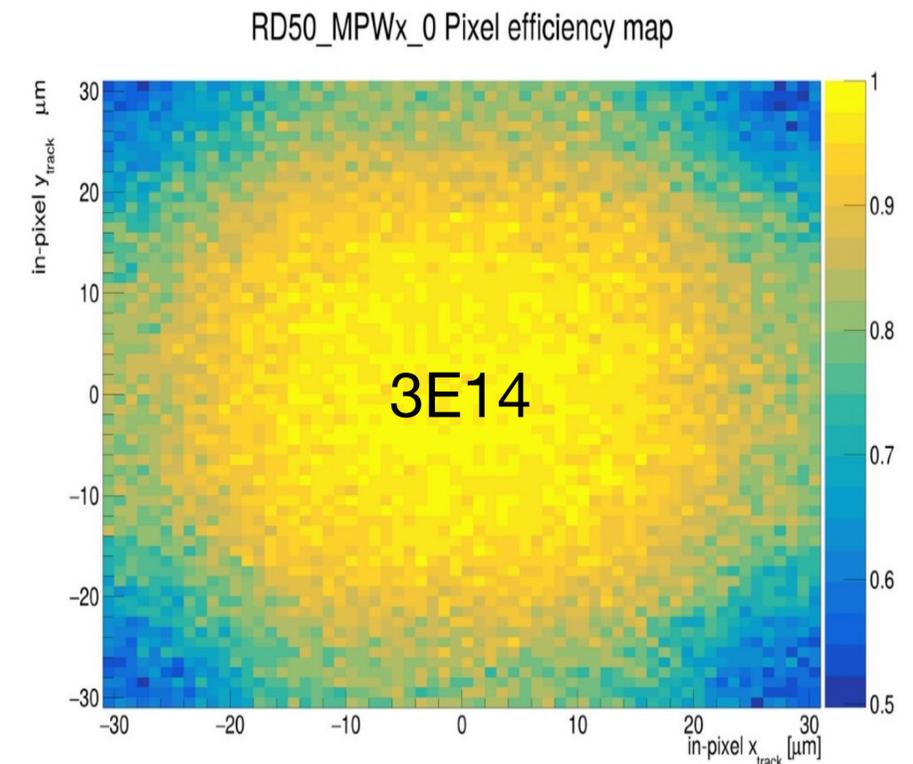
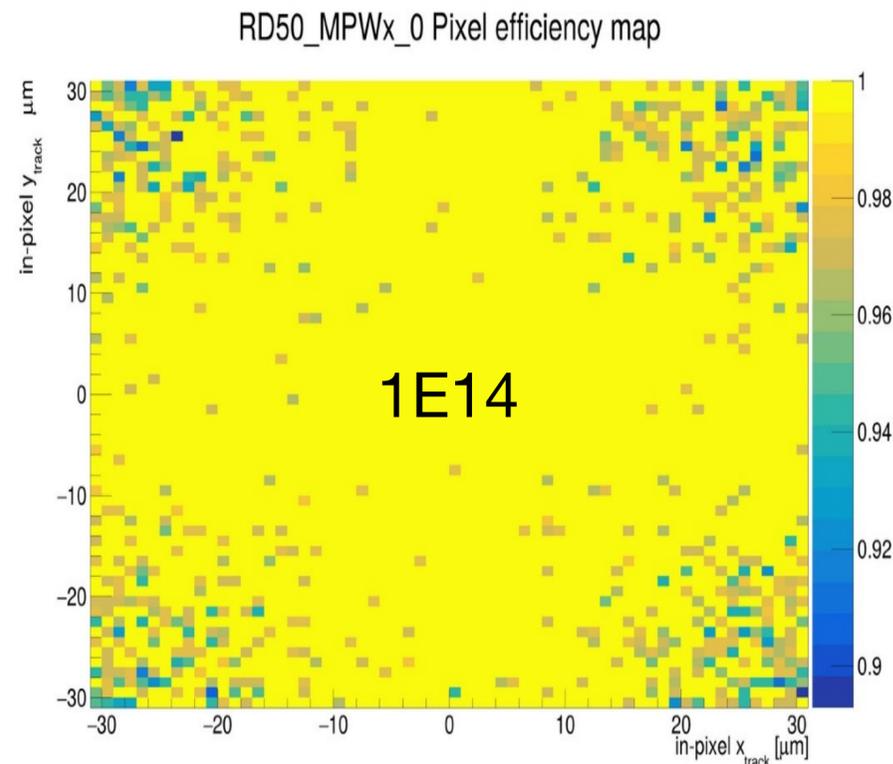
束流测试 II

- 2024年10月, DESY, 测试经过辐射的探测器, 冷却到 -15°C .
- 初始工作情况: 190 V高压, 200 mV阈值电压 (杜绝噪声干扰).
- 探测有效率随着辐射剂量降低.

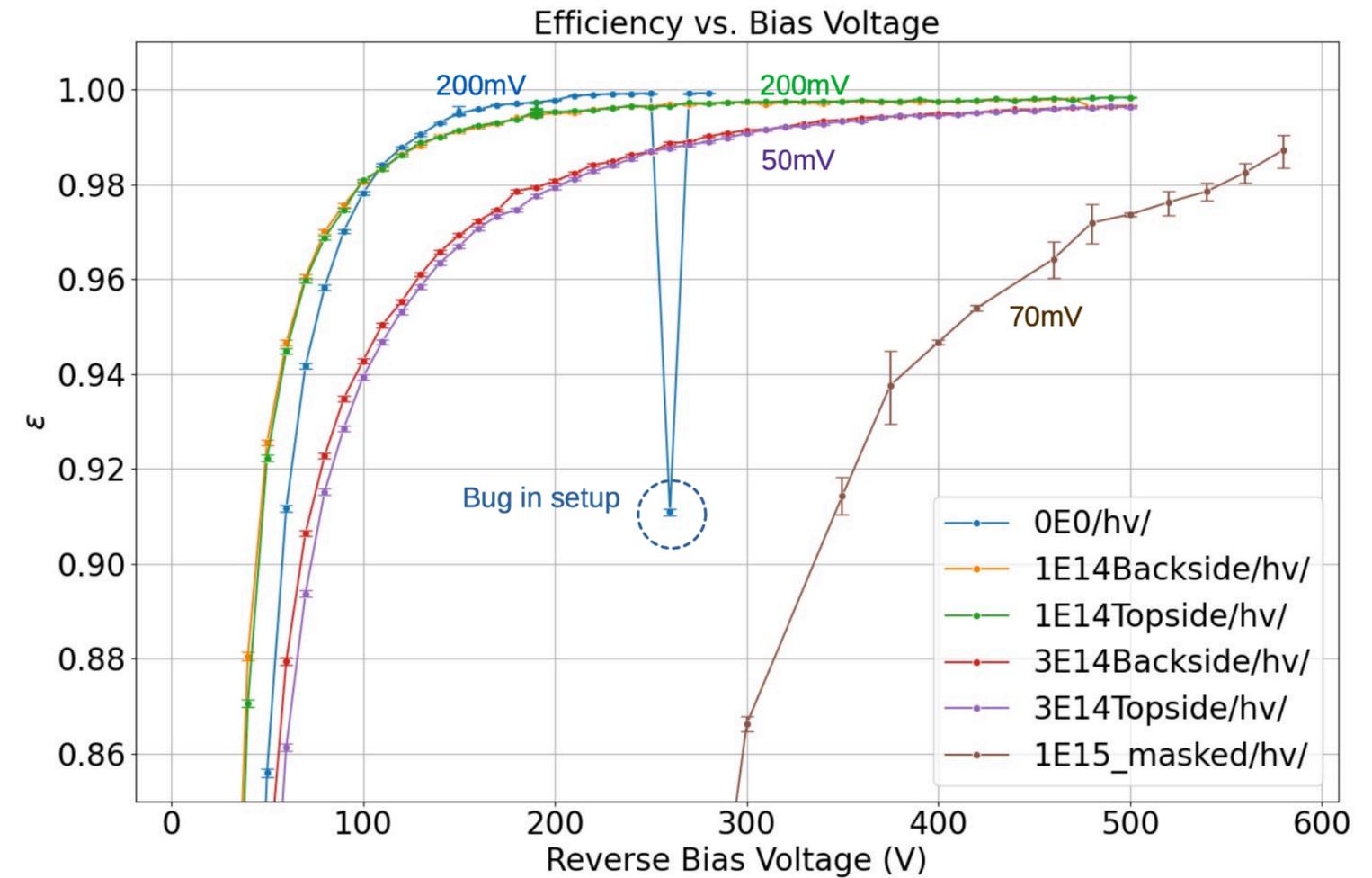
DUT	Total Efficiency
0E00	99.8%
1E14	99.5%
3E14	85.5%
1E15	8.9%



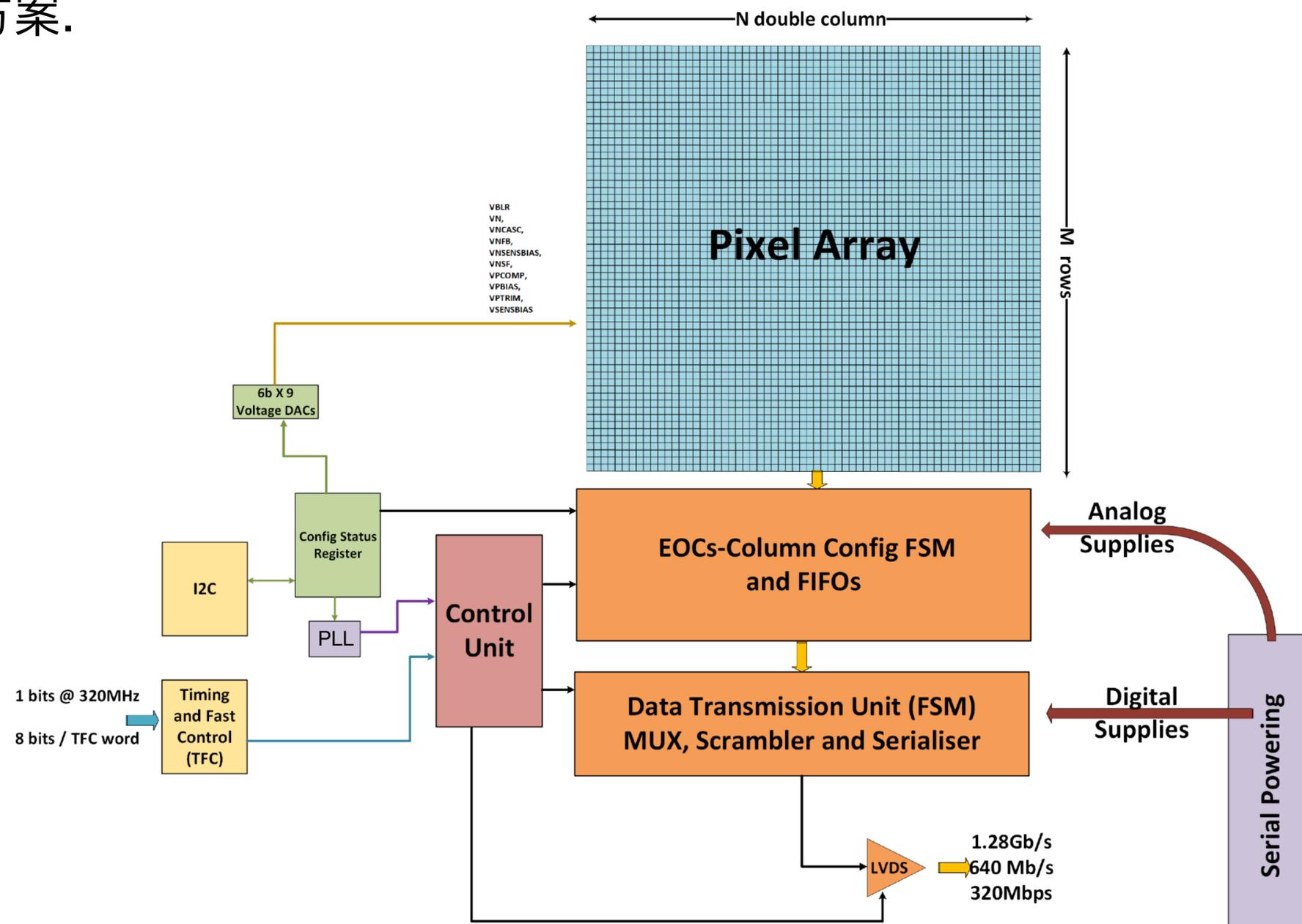
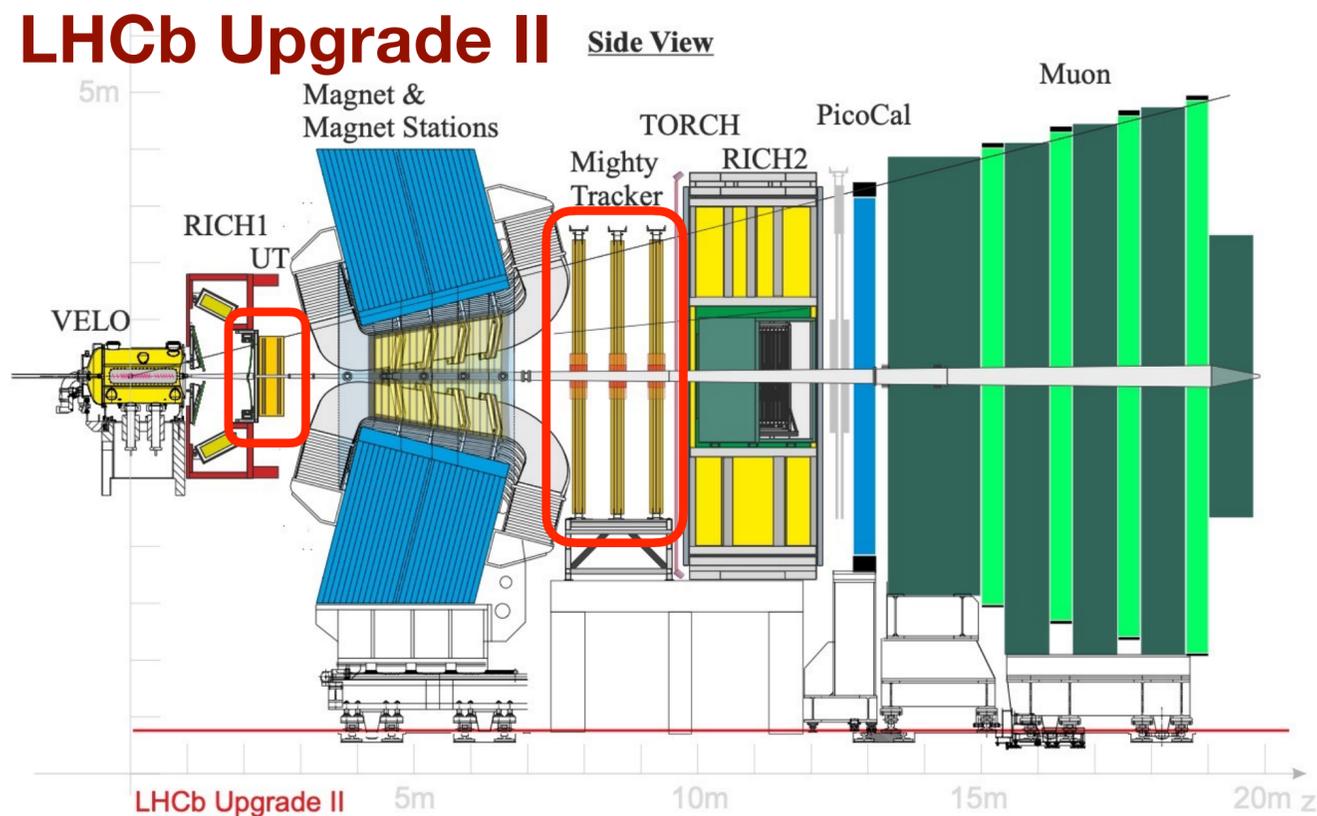
- 像素内有效率在角落因为电荷与邻近像素分享而降低.



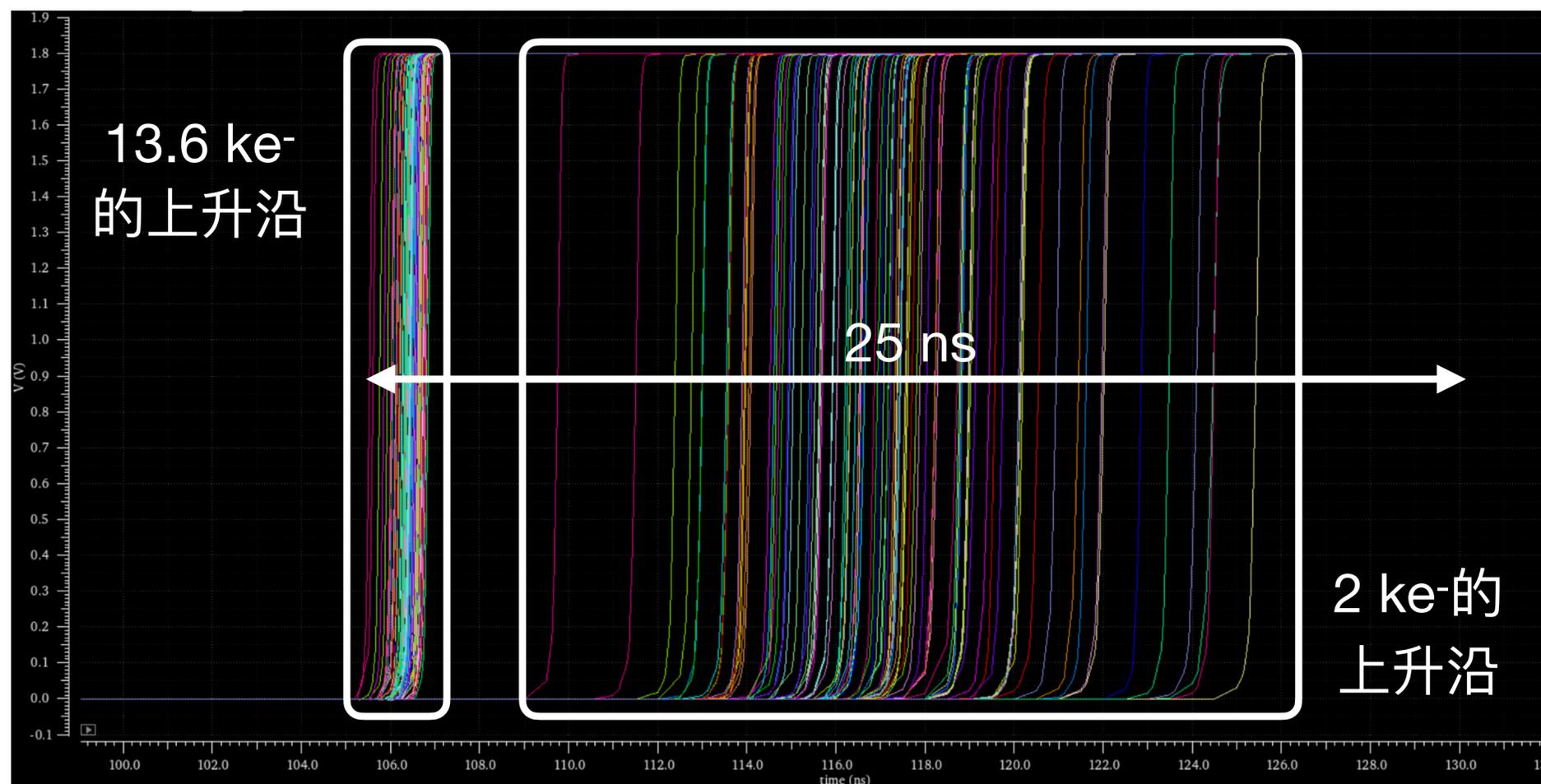
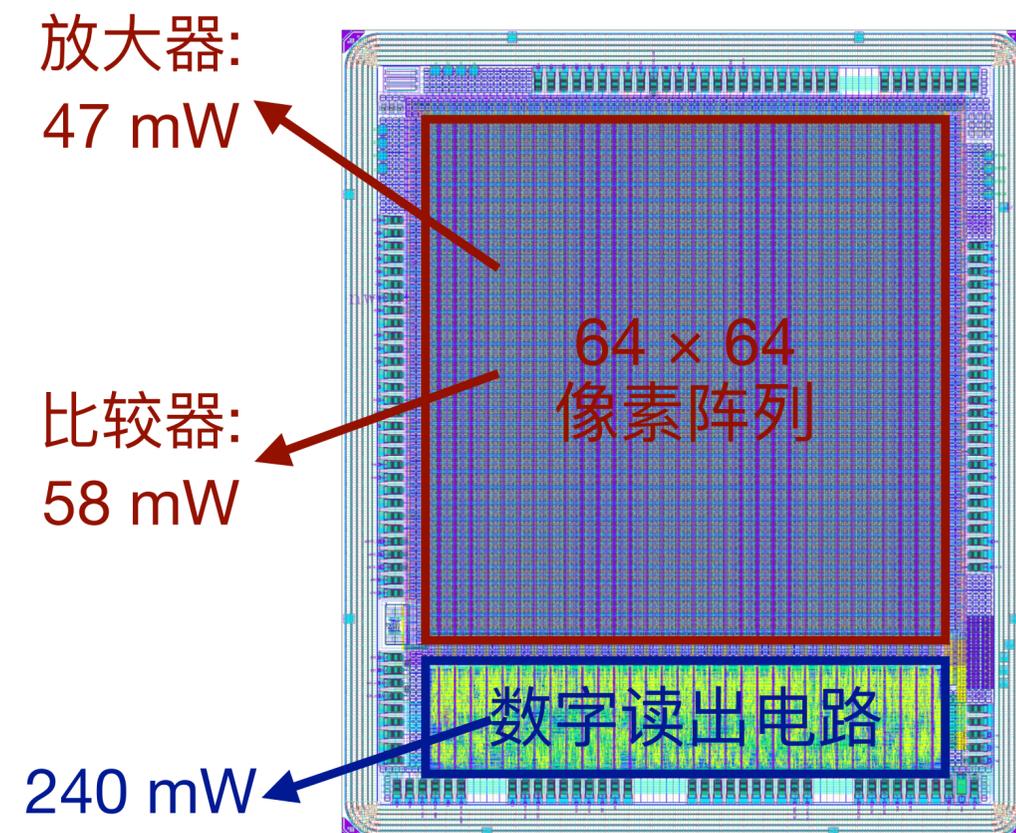
- 改进工作情况: 增大偏置高压, 降低阈值电压.
- 辐射剂量为 $1E14$ 与 $3E14$ 的探测器仍可达到99.9%的有效率.
- $1E15$ 的探测器未经过背部处理, 从正面加高压, 可达到98.7%的有效率.
- 已将更多的探测器送去辐射: $5E14$, $1E15$, $2E15$, $3E15$, $5E15$; 包括未经背部加压的样品.
- 第三轮束流测试在2025年6月, 更精细地了解HV-CMOS的抗辐射性能, 和背部加压对抗辐射性能的影响.
- 测量粒子到达的时间戳, 时间分辨率约为10 ns (时钟周期 25 ns).



- 在RD50-MPW4的基础上, 设计RadPix探测器, 作为LHCb Upgrade II中的Mighty Tracker与UP的备选方案.
- 更大的像素阵列, 适当调整像素大小.
- 改变数字读出, 匹配LHCb的数据读出格式.
- 加入串行供电.
- 2025年夏天投片RadPix1 (0.5 cm × 2 cm).



- LHCb Mighty Tracker要求功耗小于 150 mW/cm^2 .
- RD50-MPW4的像素阵列消耗约 600 mW/cm^2 .
- 仿真模拟: 当放大像素面积到 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$, 以及使用低功耗模式, 功耗可降至 180 mW/cm^2 . 99%的粒子可在25 ns的窗口内被探测到.
- 需进一步优化像素电路.



transient
noise
simulation

- 单片高压CMOS (HV-CMOS)探测器在未来的高能物理实验如CEPC, HL-LHC, FCC中有着巨大的应用前景:
 - 单层硅晶片: 更薄的探测器厚度 (50 μm)
 - 较小的像素面积 (50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)
 - 较低的制造成本 (~ 90 万/ m^2)
 - 较好的抗辐射性能 ($> 10^{15}$ 1MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)
- 使用更小的技术节点 (55 - 65 nm), 进一步减小像素面积, 提高数据读出速率和抗电离辐射能力.
- 拓展粒子探测器在高能物理实验以外的应用场景, 如辐射监测、医疗放射计量控制和宇宙高能粒子探测等潜在应用前景.

一作或通讯作者:

- [1] C. Zhang et al., Development of RD50-MPW2: a high-speed monolithic HV-CMOS prototype chip within the CERN-RD50 collaboration, POS (2020), <https://doi.org/10.22323/1.370.0045>.
- [2] C. Zhang et al., High-performance HV-CMOS sensors for future particle physics experiments — an overview, Journal of Instrumentation (2022), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/C09025>.
- [3] C. Zhang et al., Design and evaluation of UKRI-MPW0: An HV-CMOS prototype for high radiation tolerance, NIM-A (2022), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167214>.
- [4] P. Sieberer, C. Zhang et al., RD50-MPW3: a fully monolithic digital CMOS sensor for future tracking detectors, Journal of Instrumentation (2023), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/C02061>.
- [5] C. Zhang et al., Measurement of UKRI-MPW0 after irradiation: an HV-CMOS prototype for high radiation tolerance, Journal of Instrumentation (2024), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/03/C03061>.
- [6] C. Zhang et al., RD50-MPW: a series of monolithic High Voltage CMOS pixel chips with high granularity and towards high radiation tolerance, Journal of Instrumentation (2024), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/04/C04059>.
- [7] C. Zhang et al., Design and evaluation of UKRI-MPW0: a monolithic HV-CMOS pixel sensor with backside biasing, Journal of Instrumentation (2024), <http://doi.org/10.1088/1748-0221/19/11/p11011>.
- [8] C. Zhang et al., Design and evaluation of UKRI-MPW1: a monolithic HV-CMOS pixel sensor with high radiation tolerance, Journal of Instrumentation (2024), accepted for publication.